

# 雷达测流技术研究进展

黄煜<sup>1</sup>, 陈华<sup>1\*</sup>, 石绍应<sup>2</sup>, 黄凯霖<sup>1</sup>, 鄢康<sup>1</sup>, 张金林<sup>3</sup>, 甘良才<sup>4</sup>, 王俊<sup>1</sup>, 刘炳义<sup>1</sup>, 马绍忠<sup>1</sup>

<sup>1</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

<sup>2</sup>华东师范大学通信与电子工程学院, 上海

<sup>3</sup>武汉玉航科技有限公司, 湖北 武汉

<sup>4</sup>武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2021年11月26日; 录用日期: 2021年12月20日; 发布日期: 2021年12月30日

## 摘要

江河流量监测是水文测验的重要内容, 其对于水资源调度分配和防洪减灾意义重大。传统接触式测流作为最常用的测流方式, 存在效率低、时效性差、洪水期测验困难等问题。雷达测流采用非接触式测流方法, 因具有较好的测流精度, 且不受气候条件、河水涨落、河道漂浮物等影响, 弥补了传统测流方法的不足, 在水文测验中得到了广泛应用。本文详述阐明了雷达测流原理、系统性总结了国内外雷达测流的发展历程和当前主流的雷达测流信号处理方法, 指出了雷达测流技术研究中存在的主要问题并对未来的研究方向进行了展望, 有助于促进雷达技术在江河流量监测中的应用和推广, 提高水文测验的效率和安全性, 推进智慧水文的建设与发展。

## 关键词

水文测验, 流量监测, 非接触式, 雷达技术

# Study Progress of Radar Technology in River Flow Monitoring

Yu Huang<sup>1</sup>, Hua Chen<sup>1\*</sup>, Shaoying Shi<sup>2</sup>, Kailin Huang<sup>1</sup>, Kang Yan<sup>1</sup>, Jinlin Zhang<sup>3</sup>, Liangcai Gan<sup>4</sup>, Jun Wang<sup>1</sup>, Bingyi Liu<sup>1</sup>, Shaozhong Ma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>School of Communication & Electronic Engineering, East China Normal University, Shanghai

<sup>3</sup>Wuhan Yuhang Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

<sup>4</sup>Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Nov. 26<sup>th</sup>, 2021; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2021; published: Dec. 30<sup>th</sup>, 2021

作者简介: 黄煜, 男, 福建三明人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。

\*通讯作者 Email: chua@whu.edu.cn

文章引用: 黄煜, 陈华, 石绍应, 黄凯霖, 鄢康, 张金林, 甘良才, 王俊, 刘炳义, 马绍忠. 雷达测流技术研究进展[J]. 水资源研究, 2021, 10(6): 581-590. DOI: 10.12677/jwrr.2021.106063

## Abstract

River flow measurement is an important content of hydrological monitoring, which is of great significance to water resources dispatching and distribution, flood prevention and disaster reduction. Traditional contact flow measurements, as the most commonly used flow measurement methods, have lots of problems such as low efficiency, poor timeliness, and difficulty in measuring during flood periods. Flow measurement of radar is a non-contact flow measurement method. Because it has good flow measurement accuracy and is not affected by weather conditions, river fluctuations, river floats, etc., it makes up for the shortcomings of traditional flow measurement methods and has been widely used in hydrological measurement. This paper clarifies the principle of radar flow measurement in detail, systematically summarizes the development history of radar technology in flow measurement and its signal processing methods, and points out the main problems and prospects in radar in flow measurement research, which is helpful to promote the application and popularization of radar technology in river flow monitoring, improve the efficiency and safety of hydrometric and promote the construction and development of smart hydrology.

## Keywords

Hydrometric, Flow Monitoring, Non-Contact, Radar Technology

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

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

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



## 1. 引言

流量作为河流最基础的水文特征值,是水文水资源规划管理和水利工程建设的重要资料。对河流进行水文监测,有利于预防洪涝灾害的发生和减少人员财产损失[1][2]。随着科学技术和社会经济的快速发展,水利行业对水文监测信息的时效性和可靠性需求越来越迫切。然而,迄今大多数河流仍采用以接触式为主的传统水文测流方法,如转子式流速仪法、浮标法等[3]。这类方法虽能在测流精度上满足要求,但需要人工进行操作,不仅安全隐患多,还存在流程繁琐、效率低、历时长、时效性差等问题[4]。近年来,国内也开始引进国外一些先进的测流技术,其中以声学多普勒剖面流速仪(Acoustic Doppler Current Profile, ADCP)应用较多。此方法虽精度较高,但其本质上仍属于接触式测流,存在一些不足。如 ADCP 多安装于水下,易受到水体含沙量或水中漂浮物的影响,也易生长或附着水生生物,维护成本较高。测验范围和精度受限,存在高速流、紊流无法精确测验,在超声波盲区无法测量水面和靠近河底流速等问题[2]。传统的接触式测流方法已经越来越难以满足新时期流域动态化、精细化和智慧化管理需求,如何在保证测流精度的同时,做到全自动、准确、实时测量,研究人员开始将目光着眼于非接触式监测方法。

国内外目前主流的非接触测流方法主要包括视频测流和雷达测流。在视频测流过程中,视频图像成像质量会直接影响到水流表面流场计算效果。在大雨、夜间或阳光直射水面等显著影响水面光照强度分布的条件下,流场表面像素分布将难以表征水流流动特征,基于视觉方法的表面流场计算结果会存在较大的误差,无法准确获取表面流速[5]。雷达技术在军事上取得的巨大成功,引起了国内外学者对于雷达技术应用在其他领域的极大重视。雷达的优点是白天黑夜均能探测远距离的目标,且不受雾、云和雨等气象条件的阻挡,具有全天候、全天时的特点。美国地质调查局(U.S. Geological Survey, USGS)专门成立了水文二十一委员会,确定了雷达技术最有希望应用于水深、水位以及水面流速的远程监测。雷达波流速仪与 ADCP 类似,也是一种利用多普勒原理的

测速仪器，即根据回波频率的改变对目标物体的速度进行计算，但区别在于 ADCP 是利用超声波在水中的传播特性而测速，其频率范围一般在数十至数百千赫兹。由于超声波在空气中传播时衰减很快，故不能应用于较远距离的测量，而雷达流速仪使用电磁波，频率高达 10 GHz 以上，可以很好地在空气中传播，衰减较小。因此使用雷达流速仪监测流速时，仪器不必接触水体，即可远距离测得水面流速，属非接触式监测，且不受测验河道的漂浮物、滚石等影响，很适合实现水文测验自动化，提高水文资料的时效性和可靠性[6] [7]。

## 2. 雷达测流原理

1842 年，奥地利物理学家多普勒(Christian Andreas Doppler)发现，当被测目标和观察者之间发生相对运动时，回波信号的频率与波源初始发出的信号频率将有所不同。若目标物体与波源相向运动，波会被压缩，波长变短，频率增加。反之，若目标物体与波源背向运动，波长变长，频率降低。频率升高或者降低的数值则称为多普勒频率[8]。

当波源发射电磁波到目标物体上，发射频率为  $f_0$ ，速度为  $u$ ，物体的运动速度为  $v_0$ 。此时，运动物体所接受到的电磁波频率为  $f_1$ ：

$$f_1 = \frac{u - v_0}{v_0} f_0 \tag{1}$$

之后，当电磁波由目标物体返回信号源时，信号源所接收到的频率为  $f'$ ：

$$f' = \frac{v_0}{u + v_0} f_1 \tag{2}$$

因此，回波频率与波源频率的关系如下：

$$f' = \frac{v_0}{u + v_0} \frac{u - v_0}{v_0} f_0 = \frac{u - v_0}{u + v_0} f_0 \tag{3}$$

当物体接近波源时，上式  $v_0$  的符号相反，因此回波信号频率与波源频率的关系可以表示如下：

$$f' = \frac{u \mp v_0}{u \pm v_0} f_0 \tag{4}$$

发射信号与回波信号的频率差值称为多普勒频率  $f_d$ ，用下式表示：

$$f_d = f_0 - f' \approx \frac{2v_0}{u} f_0 \tag{5}$$

如图 1 所示，在雷达测流中，雷达一般与水面呈一定夹角  $\theta$ ，则根据式(5)可得到水面的流速为：

$$v_0 = \frac{u}{2f_0 \cos \theta} f_d \tag{6}$$

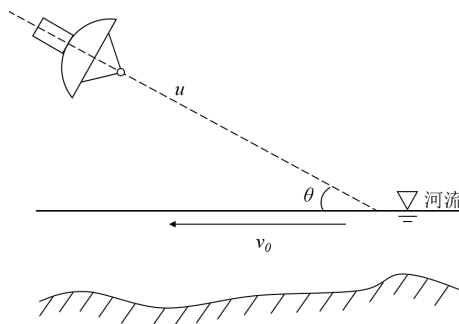


Figure 1. Flow measurement of radar  
图 1. 雷达测流示意图

### 3. 雷达测流发展历史

#### 3.1. 雷达的产生

1819年, Oersted 教授发现罗盘针在通电导线附近将发生偏转, 电磁科学就此诞生。之后, 经过对这种现象的不断研究, 法拉第发明了发电机, 麦克斯韦阐明了电磁学理论, 并推断电磁波以光速传播[9]。人们通常认为雷达技术起源于第二次世界大战, 实际上雷达原理早在 1897 年就起源于无线技术, 当时 Alexander Popov 发现一艘经过的船只对其无线信号的传输时造成了干扰。到 1904 年, 德国人 Christian Hülsmeier 制造了第一台连续波雷达设备, 工作频率为 650 MHz, 能够在浓雾中检测 2 英里范围内的海上船只的存在[10]。

#### 3.2. 探地雷达

随着雷达技术的不断发展, 雷达开始应用于各行各业。在水利工程中, 雷达技术最早应用于地质勘探, 主要用于生成地下沉积物的高分辨率剖面, 使用广泛且较为成功[11]。在地表水文学方面, Davis 等人的研究表明, 当河流水位监测较为困难或危险时, 可以使用探地雷达代替传统测量方法以获取河流水深估计值[12]。Spicer 等人在华盛顿州西南部的四个河段进行了河道横断面测量试验, 将探地雷达悬挂在水面上方的桥梁或索道上, 以收集河床的雷达剖面图, 结果表明, 探地雷达能够相当准确地测量河道断面, 并且比传统的测量速度快得多, 同时避免了将仪器放置在水中相关的问题和风险[13]。为了解决探地雷达原始信号复杂难处理问题, 2014 年 Chen 等将 Hilbert-Huang 变换引入探地雷达信号处理中, 建立了一种非接触式河道断面测量方法, 能够准确快速地测量河流横断面积, 与传统方法相比, 新方法可以大大降低风险, 测量时间和人力[14]。现今, 探地雷达的功能也越来越丰富, 常用于河道沉积物分析[15]、河堤监测[16]、防洪预警[17]等, 成为智慧水文建设中不可或缺的工具。

#### 3.3. 点式雷达流速仪

在测流方面, 雷达技术最早于 1990 年被美国学者 Plant 等用于海洋观测[18], 此后相继被日本研究者 Takayuki 等人和美国地质调查局(USGS)引入河道表面流速观测[19]。早期产品多以点式雷达流速仪为主, 一般分为手持式、桥测式、缆道式及车载式 4 种。2000 年, Costa 等人使用车载多普勒雷达测速仪首次利用非接触式雷达系统成功测得了河流表面流速数据, 并计算得到河流流量[20]。2002 年, Lee 采用 X 波段脉冲雷达扫描了河段表面速度的横向分布, 并根据垂直速度分布遵循幂和对数定律的假设, 准确估计了河流流量。同年, 他提出并应用了一种确定河流横断面深度和流量的改进方法, 即在垂直速度分布模型中考虑 Darcy-Weisbach 摩擦系数, 以获得更为精确的计算模型, 并将 X 波段脉冲雷达与浮标法的误差控制在 3% 以内[21][22]。2002 年, Robert 首次将探地雷达与表面流速雷达相结合, 将其应用到河床形态的频繁迁移以及河道的冲刷和填充地区, 表明雷达测流系统相较于传统方法更为合理, 可用于在中高流量期间进行连续、实时的流量测验[23]。2017 年, Hong 也采用了探地雷达和测速雷达相结合的方法, 提出了砾石床渠道河流流量估算方法, 建立了水面速度与平均速度的关系和河流断面的关系, 与指数流速法相比, 所提出的方法具有更好的性能[24]。2019 年, Yang 等将概率速度分布方程引入到渠道横断面中的流速分布的计算当中, 将表面速度转换为垂直方向上的平均速度, 可靠和准确的估计了衬砌灌溉渠道流量[25]。2020 年, Chen 等分析对比了雷达流速仪、ADCP 和转子流速仪对河道测流的适用性, 得出在综合考虑现场操作人员的安全、起伏的地形或复杂的水流的情况下, 雷达流速仪的非接触测流方法是近年来最合适的测流方法, 其能够减少测量时间, 同时保持测量的高精度[26]。同年, Fulton 采用雷达测流仪在美国 10 个不同水文和水力特征的河段, 使用流速概率分布计算平均断面流速和流量, 并与常规方法进行比较。结果表明, 雷达测速仪所计算的结果与传统方法高度相近, 可用于提供实时表面速度、平均速度和流量[27]。在国内, 点式雷达流速仪的应用多以比测试验为主, 并已在中小河流水文测验和应急抢险监测得以应用。

如王文华[28]、秦福清[29]、景波云[30]、李庆平[31]等人试验均表明雷达流速仪较传统流量监测方法更具优势,且能保持较高精度。

### 3.4. 侧扫式测流雷达

近年来,测流雷达开始往侧扫式雷达方向发展。与点式雷达流速仪相比,侧扫雷达不仅能改变波束接收的位置方向,抑制噪声干扰的影响[32],还可以加强接收信号的增益,高效地分辨空间的来波信号方向[33]。侧扫式测流雷达最初是用来监测海面涌流分布,之后才被用于河流表面流场的测验,一般架设在河岸边,多采用 UHF 波段,获取的是分段距离内的平均流速,而非单点流速,因此可连续自动监测河道的表面流速[34]。2005 年, Ma 等最先基于海洋状态测量和分析雷达系统提出了 UHF 表面流雷达系统的设计方法[35] [36]。同年, Wang 等将 UHF 测流雷达系统在三个河道现场进行了试验,结果表明 UHF 雷达监测与转子流速仪测验结果相近[37]。2007 年, Wen 等对 UHF 雷达测流系统进行了改进,将发射功率控制在 5 W 以下,探测最大范围增至一公里,并用试验验证了系统的可靠性[38]。2013 年,李自立等将 UHF 雷达测流系统用于长江武汉段,构建了表面流速与断面流速分布的关系模型,并准确估算了断面流量[39]。2014 年,文必洋等提出了一种利用河流回波信号校准阵列通道的算法,大幅提高了信号的角估计准确性[40]。2019 年, Yang 等将 RANS 方程简化为二维泊松方程,并使用闭合边界条件求解横断面速度分布,结果表明所提出的模型优于幂律和对数律模型,该方法计算的河流流量与湖北仙桃水文站提供的流量具有很高的一致性。2020 年, Yang 等在湖北仙桃的汉江使用超高频雷达,采用指标流速法计算断面平均流速。使用 3 月至 7 月的数据来选择最佳指标速度(平均横断面速度、最大流速)。并用建立的指标流速模型,估计 6 月到 7 月平均横断面速度和河流流量,结果与湖北仙桃水文站测量提供的结果误差在 5% 以内[41]。目前,侧扫测流雷达仍然处于研究验证阶段,推广应用很少。

## 4. 雷达测流信号处理

为获得河流表面流速,需对多普勒信号进行分析计算。目前多普勒雷达信号的处理方法可分为三种,时域分析法、频域分析法和其他分析法。其中,时域分析法主要有过零检测法和数周期法,这两种方法存在较多缺点,测量结果存在不稳定性,精度较低。其他分析法有小波变换方法、时频分析方法等,这两种方法需要的数据量大、计算时间长、多为离线计算,不适合雷达的实时测验[8]。目前雷达信号处理的主流方法为频域分析法,包括经典谱估计和现代谱估计。

### 4.1. 经典谱估计法

经典谱估计法是以傅里叶变换为基础的分析方法,目前广泛应用于雷达测流信号处理和雷达流速仪的设计中,包括直接法和间接法[42]。

直接法就是将随机信号  $x(n)$  的  $N$  个离散点作为一个序列  $x_N(n)$ , 对其进行傅里叶变换,求得  $x_N(e^{j\omega})$ , 之后取幅值的平方除以  $N$ , 得到真实功率谱  $P(e^{j\omega})$ , 并将  $\omega$  在单位圆上等间距取值得到离散功率谱  $\hat{P}_{PER}(k)$ , 即:

$$\hat{P}_{PER}(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \right|^2 \quad (7)$$

由上式可以看出离散功率谱需进行  $n^2$  次乘法和  $n^2$  次加法计算,过程复杂且计算量较大。考虑到点式雷达流速仪设备的便携性和成本,因此在实际计算时,多采用快速傅里叶变换  $FFT$  (Fast Fourier transform) 来进行运算。Alimenti 等[43]采用  $FFT$  算法,设计了一种低成本的雷达流速仪,其测量效果准确,精度可与商用雷达流速仪相媲美。 $FFT$  算法原理即利用  $e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$  的对称性和周期性对离散信号  $x(n)$  不断细分,将计算步骤减少到  $(n/2)\log_2 n$  次乘法和  $n\log_2 n$  次加法,在减少计算步骤的同时保证结果精度。

间接法则是先计算信号  $x(n)$  的自相关函数  $\hat{r}(m)$ ，之后对自相关函数进行傅里叶变换，得到的功率谱估计  $\hat{P}_{BR}(\omega)$ ：

$$\hat{r}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n+k)x^*(n), k = 0, 1, 2, 3, \dots, M \quad (8)$$

$$\hat{P}_{BR}(\omega) = \sum_{m=-M}^M \hat{r}(m)e^{-j\omega m}, |M| \leq N-1 \quad (9)$$

## 4.2. 现代谱估计法

在经典谱估计中，无论直接法还是间接法都存在分辨率低、方差性差的问题。分辨率低是因为经典谱估计频率分辨率与数据记录长度成正比，数据记录长度越长，其分辨率越高，反之则越低[44]。但在雷达流速仪的实际应用中，数据多为短期或应急监测，无法累积足够的长度。方差性能差主要是因为经典谱估计中无求均值和极限运算，稳定性欠佳。因此，基于现代谱估计的雷达测流信号处理方法应运而生。

现代谱估计估计主要有参数模型法和非参数模型法。参数模型法有 AR (Autoregressive)模型、MA (Moving average)模型和 ARMA (Autoregressive moving average)模型等；非参数模型法有最小方差法和多分量的 MUSIC (Multiple signal classification)法[44]。

参数模型法的思路是假定信号  $x(n)$ ，是一个输入序列  $u(n)$  激励一个线性系统  $H(z)$  的输出。通过信号序列  $x(n)$  或自相关函数  $\hat{r}(m)$  来估计  $H(z)$ ，再由  $H(z)$  的参数估计  $x(n)$  的功率谱。其中，假定  $u(n)$  是均值为零，方差为  $\sigma^2$  的白噪声序列，其与  $x(n)$  的关系可以表示为：

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + \sum_{k=0}^q b_k u(n-k) \quad (10)$$

线性系统的传输函数为：

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{\sum_{k=0}^q b_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^p a_k z^{-k}} \quad (11)$$

为保证  $H(z)$  为稳定且最小的相位系统， $A(z)$  和  $B(z)$  的零点都应该在单位圆内， $x(n)$  的功率谱如下：

$$P_x(e^{j\omega}) = \frac{\sigma^2 B(e^{j\omega})B^*(e^{j\omega})}{A(e^{j\omega})A^*(e^{j\omega})} = \sigma^2 \left| \frac{B(e^{j\omega})}{A(e^{j\omega})} \right|^2 \quad (12)$$

通过对  $\sigma^2$  和  $a_k$ 、 $b_k$  的求解，就可以求出功率谱。其中：若  $b_k$  全为零，是阶数为  $p$  的自回归模型，简称 AR 模型；若  $a_k$  全为零，是阶数为  $q$  的平均移动模型，简称 MA 模型；若  $a_k$ 、 $b_k$  不全为零，则为自回归 - 平均移动模型，简称 ARMA 模型。

目前，国内外雷达测流研究中现代谱估计法的实际应用较少，仅在仿真中使用。安然等[45]基于 AR 模型，对水流速雷达信号进行了仿真处理，结果表明 AR 模型有助于提高测流精度，但在流速小于 0.4 m/s 的情况下，信号会淹没在噪声中难以提取。

以上谱估计法均能对河流表面的流速进行分析计算，但受限于算法本身原因，无法对河流方向角进行估计，进而无法对河流表面流场的重构。非参数模型中的 MUSIC 算法，因其多分量的特点，常被应用于海洋表面流的方向角估计[46] [47] [48]，近年来该方法才逐渐被应用于河流角方向估计中[40]。

其原理为：假设有  $p$  个空间回波来自不同方位  $\theta_i$  且相互独立入射到阵列上：

$$S(t) = [s(\theta_1), \dots, s(\theta_p)] \quad (13)$$

则其输出为:

$$X(t) = AS(t) + N(t) \quad (14)$$

其中,  $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_n)]$ , 为方向系数矩阵,  $N(t)$  为噪声。

$$a(\theta) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda}} \\ \vdots \\ e^{j\frac{2\pi dn \sin \theta}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

此时, 阵列信号的协方差矩阵为:

$$R_{XX} = E[XX^H] \quad (16)$$

特征值分解为:

$$R_{XX} = U\Sigma U^H = U_S \Sigma_S U_S^H + U_N \Sigma_N U_N^H \quad (17)$$

其中,  $\Sigma = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_M)$  为特征值矩阵,  $U_S$  为信号子空间和  $U_N$  噪声子空间, 其谱函数:

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta)U_N U_N^H a(\theta)} \quad (18)$$

尽管 MUSIC 估计法提升了雷达流速仪对河流表面流角度的分辨率, 为河流表面流场的重建提供了可能。但目前河流所使用的雷达流速仪仍以点式流速仪为主, 仅能对河流表面单点进行测量, 该方法在当前仅适合在中小河流和渠道的流量监测中推广。而侧扫雷达虽能对河流表面进行探测, 但其仍处于研究和比测阶段, 且其频段原受制于地方通信规约, 有可能对应用产生一些限制。

## 5. 总结与展望

雷达技术作为非接触式流量监测技术, 为水文监测行业带来了新的革命, 也将是未来主要的发展方向[49]。尽管当前雷达技术在河流流量监测上已经取得了阶段性成果, 但在实际应用中仍然存在一些技术挑战, 尚未大范围投入生产应用。

由于点式雷达测流仪仅能获得河面某一单点或某一范围内的流速, 若河面较宽, 则需布置多个设备, 将存在投入成本过高、安装维护困难和数据同化计算复杂等问题[50]。此外, 点式雷达对于安装位置和发射角度较为严格, 波束角、方位角及俯仰角等是影响仪器测量精度的主要参数, 因此目前该种设备仅适用于测验断面相对稳定, 测验河段幅宽不大, 且有桥梁、缆道或悬臂可借用的水文断面[51]。侧扫雷达的测距更远, 可监测分段距离内的平均流速, 能够对河流表面流的方向角进行估计, 在一定程度上弥补了点式雷达测流仪的不足。但目前侧扫雷达多采用 HF~UHF 波段, 受其频段和带宽的限制, 多普勒测量精度低, 很难在平滑水面或模式杂乱的紊流区域得到稳定的测量值, 且该波段可能会影响到地方通信[52]。在雷达信号分析处理中, 较为主流的是频域分析法中的经典谱估计, 即采用以傅里叶变换为基础的方法对信号回波进行频域转换, 并对频率幅值的大小进行流速计算。但受天线波束宽度、分布式多散射点和环境因素等影响, 回波信号成分繁杂, 目前信号处理多采用对回波中强散射点的多普勒谱分析, 导致多普勒谱显著展宽, 多普勒谱分析较为粗糙, 对微多普勒信息的利用尚且不足, 从而难以实现流速的高精度测量估计[53]。

因此,为解决目前雷达技术在河流流量监测方面存在的问题,可以考虑将精度更高的毫米波雷达引入测流系统中;探索多输入多输出的雷达探测方案,实现河道表面多点测量;同时,借鉴和创新多普勒谱分析算法,深度挖掘多普勒特征信息,提升测流精度与作用距离,以实现和满足新时期江河湖库动态化、精细化和智慧化管理的要求。

## 基金项目

国家重点研发计划(2019YFC1510602),湖北省重点研发计划(2020BAB029)。

## 参考文献

- [1] 李光录,王秀莲.电波流速仪在青海三江源区水文监测中的应用[J].人民长江,2010,41(14):48-50.  
LI Guanglu, WANG Xiulian. Application of electric wave current-meter in hydrological monitoring of three-river source region in Qinghai Province. Yangtze River, 2010, 41(14): 48-50. (in Chinese)
- [2] 刘代勇,邓思滨,贺丽阳.雷达波自动测流系统设计与应用[J].人民长江,2018,49(18):64-68.  
LIU Daiyong, DENG Sibin, and HE Liyang. Design and application of radar wave automatic flow measurement system. Yangtze River, 2018, 49(18): 64-68. (in Chinese)
- [3] 陈静,江海力,程遥.岸基雷达比测方案设计与应用[J].水利水电快报,2021,42(5):33-38.  
CHEN Jing, JIANG Haili, and CHENG Yao. Design and application of shore-based radar comparing measurement. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(5): 33-38. (in Chinese)
- [4] 吴志勇,徐梁,唐运忆,等.水文站流量在线监测方法研究进展[J].水资源保护,2020,36(4):1-7.  
WU Zhiyong, XU Liang, TANG Yunyi, et al. Research progress of on-line discharge monitoring methods in hydrometry stations. Water Resource Protection, 2020, 36(4): 1-7. (in Chinese)
- [5] 张振,徐枫,王鑫,等.河流水面成像测速研究进展[J].仪器仪表学报,2015,36(7):1441-1450.  
ZHANG Zhen, XU Feng, WANG Xin, et al. Research progress on river surface imaging velocimetry. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(7): 1441-1450. (in Chinese)
- [6] 梅军亚,陈静,香天元.侧扫雷达测流系统在水文信息监测中的比测研究及误差分析[J].水文,2020,40(5):54-60.  
MEI Junya, CHEN Jing, and XIANG Tianyuan. Intercomparison and error analysis of side scan radar discharge measurement system on hydrological information collection. Journal of China Hydrology, 2020, 40(5): 54-60. (in Chinese)
- [7] 李忱,王志毅,张越.雷达技术在水文测验上的应用[J].水利信息化,2020(4):42-48.  
LI Chen, WANG Zhiyi, and ZHANG Yue. Application of radar technology in hydrometry. Water Resources Informatization, 2020(4): 42-48. (in Chinese)
- [8] 杨蓉.多普勒雷达测速系统设计及信号处理方法研究[D]:[硕士学位论文].武汉:华中科技大学,2012.  
YANG Rong. Doppler radar speed measurement system design and signal processing method research. Master's Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] JAMES, R. J. A history of radar. IEEE Review, 1989, 35(9): 343-349. <https://doi.org/10.1049/ir:19890152>
- [10] GUARNIERI, M. The early history of radar. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010, 4(3): 36-42.  
<https://doi.org/10.1109/MIE.2010.937936>
- [11] SMITH, D. G., JOL, H. M. Ground-penetrating radar investigation of a Lake Bonneville Delta, Provo Level, Brigham-City, Utah. Geology, 1992, 20(12): 1083-1086. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<1083:GPRIOA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<1083:GPRIOA>2.3.CO;2)
- [12] DAVIS, J. L., ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, 1989, 37(5): 531-551. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- [13] KURT, R. S., JOHN, E. C. Measuring flood discharge in unstable stream channels using ground-penetrating radar. Geology, 1997, 25(5): 423-426. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0423:MFDIUS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0423:MFDIUS>2.3.CO;2)
- [14] CHEN, Y. C., KAO, S. P., and WU, J. H. Measurement of stream cross section using ground penetration radar with Hilbert-Huang transform. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 2468-2477. <https://doi.org/10.1002/hyp.9755>
- [15] ANCHUELA, O. P., FRONGIA, P., DI GREGORIO, F., et al. Magnetometry and ground-penetrating radar surveys applied to tracing potential collectors of mining-derived pollutants in coastal sediments. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(5): 230. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6555-3>
- [16] TOMECKA-SUCHON, S. Ground penetrating radar use in flood prevention. Acta Geophysica, 2019, 67(6): 1955-1965. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00353-8>
- [17] DI PRINZIO, M., BITTELLI, M., CASTELLARIN, A., et al. Application of GPR to the monitoring of river embankments.



- Journal of Applied Geophysics, 2010, 71(2-3): 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.04.002>
- [18] PLANT, W. J., KELLER, W. C. Evidence of bragg scattering in microwave doppler spectra of sea return. Journal of Geophysical Research-Oceans, 1990, 95(C9): 16299-16310. <https://doi.org/10.1029/JC095iC09p16299>
- [19] TAKAYUKI, YAMAGUCHI, and KUNIO. Flood discharge observation using radio current meter. Japanese Society of Civil Engineers, 1994, 28(497): 41-50. [https://doi.org/10.2208/jscej.1994.497\\_41](https://doi.org/10.2208/jscej.1994.497_41)
- [20] COSTA, J. E., SPICER, K. R., CHENG, R. T., et al. Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment. Geophysical Research Letters, 2000, 27(4): 553-556. <https://doi.org/10.1029/1999GL006087>
- [21] LEE, M.-C., LAI, C.-J., LEU, J.-M., et al. Non-contact flood discharge measurements using an X-band pulse radar (I) theory. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(02\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(02)00048-1)
- [22] LEE, M. C., LEU, J. M., LAI, C. J., et al. Non-contact flood discharge measurements using an X-band pulse radar (II) Improvements and applications. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(02\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(02)00052-3)
- [23] ROBERT, R., MASON JR., J. E. A proposed radar-based streamflow measurement system for the San Joaquin River at Vernalis, California. Hydraulic Measurements and Experimental Methods, 2002, 2002: 1-8. [https://doi.org/10.1061/40655\(2002\)37](https://doi.org/10.1061/40655(2002)37)
- [24] HONG, J. H., GUO, W. D., WANG, H. W., et al. Estimating discharge in gravel-bed river using non-contact ground-penetrating and surface-velocity radars. River Research and Applications, 2017, 33(7): 1177-1190. <https://doi.org/10.1002/rra.3168>
- [25] YANG, Y. H., WEN, B. Y., WANG, C. J., et al. Two-dimensional velocity distribution modeling for natural river based on UHF radar surface current. Journal of Hydrology, 2019, 577: 123930. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123930>
- [26] CHEN, F. W., LIU, C. W. Assessing the applicability of flow measurement by using non-contact observation methods in open channels. Environ Monit Assess, 2020, 192(5): 289. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8226-1>
- [27] FULTON, J. W., MASON, C. A., EGGLESTON, J. R., et al. Near-field remote sensing of surface velocity and river discharge using radars and the probability concept at 10 U.S. geological survey stream gages. Remote Sensing, 2020, 12(8): 1296. <https://doi.org/10.3390/rs12081296>
- [28] 王文华. 雷达测流仪比测分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(5): 6-9.  
WANG Wenhua. Comparing test and analysis of radar measuring instrument. Yellow River, 2016, 38(5): 6-9. (in Chinese)
- [29] 秦福清. 雷达波流速仪在中小河流流量测验中的应用分析[J]. 水利信息化, 2012(4): 42-48.  
QIN Fuqing. Application analysis on radar wave current meter at discharge measurement of middle and small rivers. Water Resources Informatization, 2012(4): 42-48. (in Chinese)
- [30] 景波云, 陈向飞, 王震, 等. 电波流速仪流量自动在线监测装置设计与应用[J]. 人民长江, 2015, 46(1): 61-64.  
JING Boyun, CHEN Xiangfei, WANG Zhen, et al. Design and application of automatic online flow monitoring device of electric wave flow meter. Yangtze River, 2015, 46(1): 61-64. (in Chinese)
- [31] 李庆平, 秦文安, 毛启红. 非接触式流量在线监测技术在山区性河流的应用研究[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2013, 31(3): 354-356.  
LI Qingping, QIN Wenan, and MAO Qihong. Application of non-contact flow online monitoring technology in mountainous rivers. Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Science Edition), 2013, 31(3): 354-356. (in Chinese)
- [32] DU, K. L., LAI, A. K. Y., CHENG, K. K. M., et al. Neural methods for antenna array signal processing: A review. Signal Processing, 2002, 82(4): 547-561. [https://doi.org/10.1016/S0165-1684\(01\)00185-2](https://doi.org/10.1016/S0165-1684(01)00185-2)
- [33] ZAVOL'SKII, N. A., MALEKHANOV, A. I., RAEVSKII, M. A., et al. Effects of wind waves on horizontal array performance in shallow-water conditions. Acoustical Physics, 2017, 63(5): 542-552. <https://doi.org/10.1134/S1063771017040145>
- [34] COSTA, J. E., CHENG, R. T., HAENI, F. P., et al. Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. Water Resources Research, 2006, 42(7): 7421-7422. <https://doi.org/10.1029/2005WR004430>
- [35] MA, Z. G., WEN, B. Y., WANG, C. J., et al. UHF surface velocities radar system design. In Proceedings of the IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits. Hong Kong, 2005: 19-21. <https://doi.org/2005.10.1109/EDSSC.2005.1635299>
- [36] MA, Z. G., WEN, B. Y., ZHOU, H., et al. UHF surface currents radar hardware system design. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(12): 904-906. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2005.859966>
- [37] WANG, C. J., WEN, B. Y., MA, Z. G., et al. Measurement of river surface currents with UHF FMCW radar systems. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2007, 21(3): 375-386. <https://doi.org/10.1163/15693930779367350>
- [38] WEN, B. Y., MA, Z. G., YUAN, F., et al. Hardware system design for UHF surface velocities radar. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2007, 18(2): 255-258. [https://doi.org/10.1016/S1004-4132\(07\)60083-8](https://doi.org/10.1016/S1004-4132(07)60083-8)
- [39] 李自立, 王才军, 李永辉. 基于超高频雷达的流量测量算法研究: 以长江武汉段为例[J]. 武汉大学学报(理学版), 2013, 59(3): 242-244.  
LI Zili, WANG Caijun, and LI Yonghui. A study on the measurement of the Yangtze River flow algorithm based on UHF radar. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2013, 59(3): 242-244. (in Chinese)

- [40] 文必洋, 许亚敏, 王才军, 等. 超高频雷达基于河流回波的通道校准算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(9): 64-67.  
WEN Biyang, XU Yamin, WANG Caijun, et al. Channel calibration algorithm for UHF radar based on echo-signal of river. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2014, 42(9): 64-67. (in Chinese)
- [41] YANG, Y. H., WEN, B. Y., WANG, C. J., et al. Real-time and automatic river discharge measurement with UHF radar. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(11): 1851-1855. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2958082>
- [42] 刘智. 多普勒测速传感器信号处理算法的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
LIU Zhi. The research of signal processing algorithm of doppler speed measurement sensor. Master's Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [43] ALIMENTI, F., BONAFONI, S., GALLO, E., et al. Noncontact measurement of river surface velocity and discharge estimation with a low-cost Doppler radar sensor. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(7): 5195-5207. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2974185>
- [44] 何燕玲. 雷达测速算法研究与软件实现[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
HE Yanling. Research and software design on algorithm of radar speed measurement. Master's Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [45] 安然, 刘小军. 基于 AR 模型的水流速雷达信号处理方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(9): 51-55.  
AN Ran, LIU Xiaojun. Signal processing method of water velocity radar based on AR model. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(9): 51-55. (in Chinese)
- [46] TEAGUE, C. C. Root-MUSIC direction finding applied to multifrequency coastal radar. In Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2002)/24th Canadian Symposium on Remote Sensing. Toronto, 2002. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026292>
- [47] YANG, S. L., KE, H. Y., WU, X. B., et al. HF radar ocean current algorithm based on MUSIC and the validation experiments. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(3): 601-618. <https://doi.org/10.1109/JOE.2005.858370>
- [48] EMERY, B M. Evaluation of alternative direction-of-arrival methods for oceanographic HF radars. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, 45(3): 990-1003. <https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2914537>
- [49] 陆伟佳, 时霞. 浅谈雷达测流技术在美国的发展[J]. 水利水文自动化, 2006(4): 43-45.  
LU Jiawei, SHI Xia. Lightly discuss development of application of radar technology in flow measurement in USA. Automation in Water Resources and Hydrology, 2006(4): 43-45. (in Chinese)
- [50] CHEN, Y. C., LIAO, Y. J., and CHEN, W. L. Discharge estimation in lined irrigation canals by using surface velocity radar. Paddy and Water Environment, 2018, 16(4): 857-866. <https://doi.org/10.1007/s10333-018-0674-7>
- [51] 徐立中, 张振, 严锡君, 等. 非接触式明渠水流监测技术的发展现状[J]. 水利信息化, 2013(3): 37-44+50.  
XU Lizhong, ZHANG Zhen, YAN Xijun, et al. Advances of non-contact instruments and techniques for open-channel flow measurements. Water Resources Informatization, 2013(3): 37-44+50. (in Chinese).
- [52] LI, K., WEN, B. Y., XU, Y. M., et al. A novel UHF radar system design for river dynamics monitoring. IEICE Electronics Express, 2015, 12(4): 20141074. <https://doi.org/10.1587/elex.12.20141074>
- [53] DRAMAIS, G., LE COZ, J., LE BOURSICAUD, R., et al. Mobile radar gauging, field procedure and results. La Houille Blanche, 2014, 100(3): 23-29. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014025>