

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108875

频域时空图像测速法的图像滤波器敏感性分析*

张 振,李华宝,袁 章,董 睿,王 杰

(河海大学计算机与信息学院 南京 211100)

摘 要:时空图像测速法是以河流表面图像中测速线为分析区域、通过检测合成时空图像的纹理主方向计算得到一维时均流速的测量方法,具有空间分辨率高、实时性强的特点。在实际应用中纹理主方向的检测精度难免会受到水面紊流、倒影、耀光、障碍物、降雨等环境扰动的影响,导致测量出现粗大误差。频域滤波技术是一种抑制噪声的有效方法,能显著提高时空图像的纹理清晰度。但现有研究在滤波器参数的敏感性分析方面存在不足,使得该方法的适用性受限。对此通过在水文站搭建在线视频测流系统采集了不同条件的河流水面视频数据,分析了 6 种典型场景下时空图像的空域及频域特性,进而开展了频域扇形滤波器方向角、通带夹角及半径参数的敏感性分析实验。实验结果表明:采用提出的椭圆形积分区域检测方向角优于现有的单像素宽直线;当设置通带夹角为 $\pm 5.3^\circ$ 且半径为 $R/2$ 时,滤波器在上述场景下均能有效地滤除噪声干扰。使得时空图像纹理主方向的检测精度在正常场景下达到 0.1° ,在复杂含噪场景下控制在 0.5° 以内,表面流速测量的相对误差小于 6.2%。

关键词:河道水流测量;时空图像测速;频域滤波;敏感性分析

中图分类号: TH815 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Sensitivity analysis of image filter for space-time image velocimetry in frequency domain

Zhang Zhen, Li Huabao, Yuan Zhang, Dong Rui, Wang Jie

(College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The space-time image velocimetry (STIV) is a time-averaged velocity measurement method, which takes a testing line as the interrogation area (IA), and detects the main orientation of texture (MOT) of a generated space-time image (STI) to estimate the 1D velocity. It has the characteristics of high spatial resolution and real-time. In practical applications, the detection accuracy of MOT is inevitably affected by environmental disturbances such as turbulence, shadow, flare, obstacle, and rain on river surface, which result in gross errors in the measurement. The image filtering technology in frequency domain is an effective method for restraining noise, which can significantly improve the texture clarity of STIs. However, the existing researches are insufficient in the sensitivity analysis of filter parameters, which limit the applicability of this method. In view of this, the video data of river surface under different conditions are collected by establishing an online video-based flow measurement system at a hydrological station. The spatial and frequency domain characteristics of STIs in six typical scenarios are analyzed. The sensitivity of three parameters of a fan filter in frequency domain, including direction angle, passband angle and radius is determined. Experimental results show that the proposed ellipse integral region is better than the existing single-pixel-wide line to detect direction angle. When the passband angle is set to be $\pm 5.3^\circ$ and the radius is $R/2$, the filter can effectively filter out the noise interference in the above scenarios. The detection accuracy of MOT reaches 0.1° in the normal scene and is controlled within 0.5° in the complex noisy scene. The relative error of the surface flow velocity measurement is less than 6.2%.

Keywords: river flow measurement; space-time image velocimetry; filtering technology; sensitivity analysis

收稿日期:2021-11-16 Received Date: 2021-11-16

* 基金项目:中国博士后科学基金面上项目(2019M651673)、中央高校基本科研业务费专项(B200202187)、江苏省水利科技项目(2021070)、浙江省水利厅科技计划项目(RB2037)、国家自然科学基金青年基金项目(51709083)、国家重点研发计划项目(2017YFC0405703)资助

0 引言

随着全球气候变化加剧,世界各地洪水灾害频发,为了建立可靠的风险预警机制来应对此类灾害,及时准确获取降雨强度、水位、流速、流量等水文信息十分关键。高洪期河道流量的测量是河流工程中最为困难的水利量测任务之一^[1],然而高洪期的河流具有流速快、含沙量高、漂浮物种类多的特点,极易造成测流仪器的损坏并威胁到测量人员的人身安全。除此之外,天然河流复杂的紊动特性难以利用点测量技术快速获取或成本很高,导致流速仪法等传统接触式测流方案无法开展布置或仪器不能正常施测。

近年来,基于图像法的测流技术发展迅速^[2-3],该技术由于具有非接触式全场测量的优势得到了广泛的关注和应用^[4-7]。根据估计表面速度的方法不同,可分为大尺度粒子图像测速法(large-scale particle image velocimetry, LSPIV)^[8]和时空图像测速法(space-time image velocimetry, STIV)^[9]。LSPIV以天然漂浮物及水面模式作为水流示踪物,自然光为主要光源,使用数码相机或摄像机采集图像,通过对水流示踪物图像进行匹配得到二维流速场分析区域。该方法已被应用于多种场景下河流表面流速监测和流量估算^[10]。

相较于LSPIV,STIV^[11]采用单像素宽的测速线代替矩形窗口作为分析区域,因此具有更高的空间分辨率和计算效率,更加适合小倾角拍摄的岸基式系统。该方法的关键核心在于纹理主方向(main orientation of texture, MOT)的检测。按图像的处理域不同检测方法可分为两大类:1)梯度张量法(gradient tensor method, GTM)、二维自相关函数法(two-dimensional autocorrelation function, QESTA)^[12]等空域方法,2)基于快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)的频域方法(FFT-STIV)^[13]。但由于拍摄的现场环境复杂,如耀光、降雨等干扰会降低时空图像的纹理清晰度。为了尽可能地减少噪声的干扰,GTm将时空图像分成若干个子区域,并引入相关性参数作为各区域角度值的权重,子区域中的纹理越清晰其值就越大,通过计算各区域角度并求平均得到更加准确的纹理主方向。但对于时空图像中干扰纹理占据较大的比重时,相关性参数在包含噪声的区域取值反而更大,导致MOT的结果出现较大的误差,表面流速测量误差达到15%以上^[14]。QESTA则通过标准化滤波器来均衡时空图像中分布不均匀的图像强度,并通过每个垂直像素阵列的标准偏差对图像进行归一化,从而使纹理变得更加清晰。但该方法只能消除竖直方向上的干扰条纹,对于其他方向的干扰仍然出现较大误差^[15];依据傅里叶变换

的自配准性质^[16],纹理图像的频谱能量分布于经过频谱中心且与空域中纹理主方向正交的谱线上,这意味着空域中所有的纹理信息在频域中进行重新分布,空域中的纹理决定了频域中谱线的方向、长度及强度。基于该原理,FFT-STIV将时空图像在空间域复杂的纹理主方向检测问题转换到在频域搜索频谱主方向^[17-18],简化了空间域复杂的卷积或梯度运算。在流速、流向较稳定的均匀流条件下,对于空间局部及短随机噪声的干扰具有较好的鲁棒性,但在流速脉动强烈的紊流条件下,时空图像中的纹理模式和频谱均呈现出展宽的趋势,导致信噪比过低而引起误检。

频域滤波是数字图像处理中图像增强的技术,通过滤波系统修正输入图像频率成分,达到图像增强的目的。文献[15, 19]采用频域扇形滤波器^[20]仅保留扇形区域中与河流水面示踪物运动相关的频谱,滤除其他区域无用的背景噪声,以提升时空图像的纹理清晰度。其中滤波器的方向角通过在幅度谱中采用单像素宽的直线进行径向积分求最大值的方式确定,并设置固定大小的通带夹角及半径构建扇形滤波器。实验表明:结合频域滤波之后,上述3种纹理主方向检测方法的精度都有所提升,其中FFT-STIV表现最好。扇形滤波器能否有效地滤除噪声的关键在于方向角设置的准确性,但现有的频域滤波方法仅给出了正常场景下方向角的确定方式,未讨论复杂含噪场景下滤波器方向角、通带夹角以及滤波半径等参数选取的敏感性,制约了频域滤波STIV的适用性。

针对上述问题,本文首先介绍了FFT-STIV和频域滤波技术的原理。其次给出了测流断面及测量系统的概况。接下来从实测数据中选取了包括正常、紊流、倒影、耀光、障碍物、降雨在内的6种典型场景下的时空图像作为数据集,分析了时空图像的空域、频域特性,进而确定频域滤波器参数的最佳取值。最后通过现场流速比测实验测试了频域滤波方法及参数选取的有效性。

1 FFT-STIV和频域滤波技术

1.1 FFT-STIV

水流示踪物在短时内运动的连续性使得时空图像(如图1(a)所示)具有方向性的纹理特征,将纹理主要走向和纵坐标轴间的夹角 δ 定义为时空图像的纹理主方向。假设物平面中示踪物在时间 T 内沿测速线方向运动了距离 D ,映射在图像坐标系下表现为在 τ 帧内运动了 d 像素,则对应测速线上的一维时均流速可以表示为:

$$V = \frac{D}{T} = \frac{d \cdot \Delta s}{\tau \cdot \Delta t} = \tan \delta \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} = v \cdot \Delta s \quad (1)$$

式中: Δt 代表时间间隔, v 表示光流运动矢量, V 与 v 仅存

在由测速线上的尺度因子 Δs 表示的缩放关系。

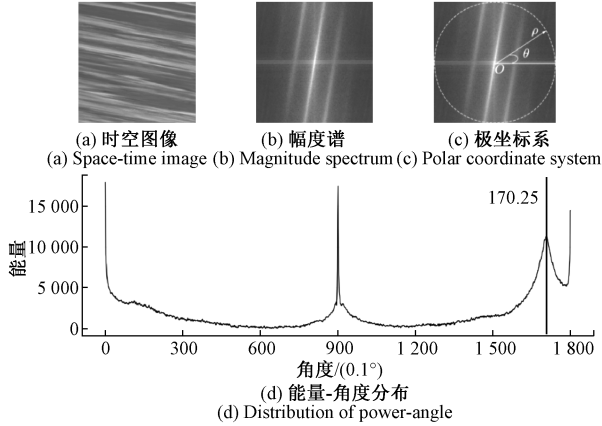


图1 频谱主方向检测

Fig. 1 Detection of the main orientation of spectrum

FFT-STIV 将 MOT 检测的过程转换到频域中搜索频谱主方向如图 1 所示,首先对时空图像进行二维离散傅里叶变换(two-dimensional discrete Fourier transform, 2 D-DFT)得到幅度谱。对于尺寸为 $L \times M$ 的图像 $f(x, y)$ 在直角坐标系下的 2D-DFT 变换公式如下式:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/L+vy/M)} = R(u, v) + jI(u, v) \quad (2)$$

幅度谱用实部 $R(u, v)$ 和虚部 $I(u, v)$ 的平方和根表示:

$$|F(u, v)| = [R^2(u, v) + I^2(u, v)]^{1/2} \quad (3)$$

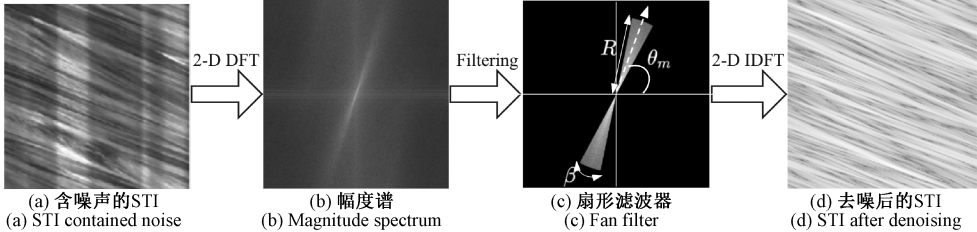


图2 频域滤波过程

Fig. 2 Process of frequency domain filtering

幅度谱中灰度的明亮程度反映出 $|F(u, v)|$ 的大小。设本文选取时空图像的大小均为 $N \times N$, 在幅度谱中以图像的中心为原点 O , $N/2$ 为半径设置搜索线, 并以步进 $\Delta\theta = 0.1^\circ$ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的区间上建立极坐标, 将搜索线上的幅度分布 $F(r, \theta)$ 按式(4)对幅度谱的平方项进行求和得到能量-角度分布:

$$P(\theta) = 2 \sum_r F^2(r, \theta) / N \quad (4)$$

曲线上峰值对应的角度定义为频谱主方向。

1.2 频域滤波技术

相较于在空间域中对图像进行滤波时会涉及到复杂的卷积运算, 图像通过 2 D-DFT 到频域之后, 该运算就会转化成为简单的乘法运算, 如下式:

$$F'(u, v) = F(u, v) \times M(\theta, \beta, R) \quad (5)$$

其中, $F(u, v)$ 、 $F'(u, v)$ 分别代表着滤波前后图像的频谱, M 是频域滤波器。具体过程如图 2 所示, 首先对含噪声的时空图像进行 2 D-DFT 得到幅度谱, 然后使用单像素宽的直线在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 区间对幅度谱进行径向积分求取频谱主方向 θ , 进而设计出方向角为 θ 、通带夹角 β 以及半径为 R 扇形滤波器对幅度谱进行滤波, 最后对滤波之后的幅度谱按式(6)进行二维离散傅里叶逆变换(two-dimensional inverse discrete Fourier transform, 2D-IDFT)得到纹理清晰的时空图像:

$$f'(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{M-1} F'(u, v) e^{j2\pi(ux/L+vy/M)} \quad (6)$$

2 测点概况

2.1 测流断面

河流视频的采集地点为攀枝花水文站, 水文站位于四川省攀枝花市, 是国家重要水文站和报讯站。测流断面如图 3(a) 所示, 河床为乱石夹沙, 断面基本稳定, 属于山区河流的砾石河床。水流折冲形成的表面波和滚漩模式为图像法测流技术提供了良好的天然示踪条件。大断面地形如图 3(b) 所示, 呈现出“W”的形状。

2.2 测量系统

视频测流系统如图 3(c) 所示, 系统主机采用壁挂支架安装在河流右岸站房一侧的边坡上, 位于缆道流速仪断面和水尺断面中间, 对应起点距为 2.9 m, 相对水位零点高程为 1007.8 m, 俯仰角 19.8° , 以上标定参数用于免像控的河流水面流场定标^[21]。主机采用市电供电, 采用 4G 网络和 VPN 技术与位于公共机进行远程通信, 由视频测流软件进行系统控制、视频数据存储、处理和结果转发。

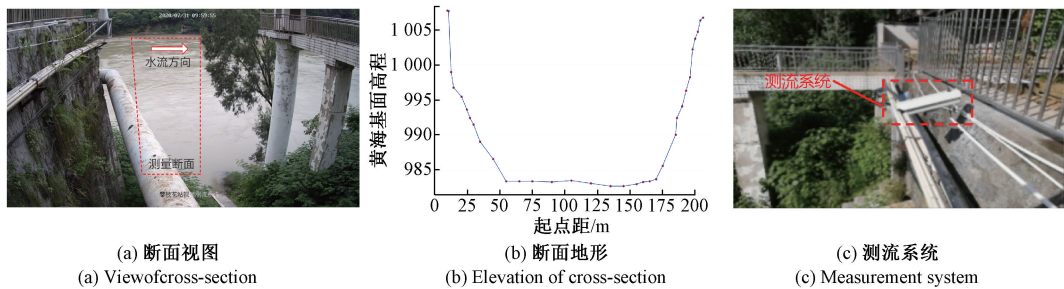


图3 测流断面及系统

Fig. 3 Flow measurement cross-section and system

3 时空图像特性分析

3.1 分析方法

通过搭建的测量系统采集了从2020年7月~2021年8月近一年的数据。设置测速线长度为750像素,视频的持续时间为30 s,25 帧/s,合成的时空图像大小为750×750 像素。选取正常、紊流、倒影、耀光、障碍物、降雨6种场景下的时空图像作为分析对象,在空域中重点分析时空图像中背景噪声分布及纹理的长度、宽度、清晰度的特点,在频域中分析幅度谱中背景直流分量、目标能量分布以及它们在幅度谱投影曲线上的特点,为滤波器参数选取提供依据。

傅里叶变换的物理意义是将图像的灰度分布函数变化为图像的频率分布,时空图像中的纹理特征属高频分量,纹理越清晰代表纹理区域灰度变化越剧烈。时空图像经2D-DFT得到频谱图,从中心往外频率逐渐增高,亮度越高表明频率特征越明显,与河流运动相关的纹理特征在频域中形成的倾斜谱线为有效谱线。分析过程中使用FFT-STIV检测MOT,真实的MOT采用人工标记的方式并计算求出。标记的示意图如图4所示,人为地在幅度谱中设置一条与有效谱线平行的线段,确定线段两个端点在幅度谱上的坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ,通过式(7)计算出线段的斜率,然后根据斜率与角度之间存在反正切的关系求出频谱主方向 θ_m :

$$\theta_m = \arctan((y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)) + 90^\circ \quad (7)$$

最后由频谱主方向与时空图像的纹理主方向存在的正交关系可以计算出纹理主方向。如图5(d)~图10(d)中,红色虚线代表人工标注的频谱主方向,将其作为真实的主方向,黑色实线代表FFT-STIV检测的结果。

3.2 正 常

在正常场景即水流为均匀流且示踪物受到环境干扰较少条件下(如图5所示),时空图像的纹理清晰且方向一致性高。在频域中形成的谱线能量集中、亮度高且大部分占据着高频区域。将幅度谱在极坐标系下投影得到

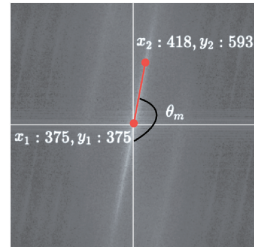


图4 人工标记频谱主方向

Fig. 4 Main direction of spectrum by manual marking

能量-角度分布曲线图如图5(d),直流分量的能量值对应着90°以及180°峰值,除直流分量之外存在一个明显的信号峰值,该峰值对应的角度为频谱主方向。在信号峰值附近的曲线对称性好,近似服从一维高斯分布,此时FFT-STIV能准确地检测到频谱主方向。

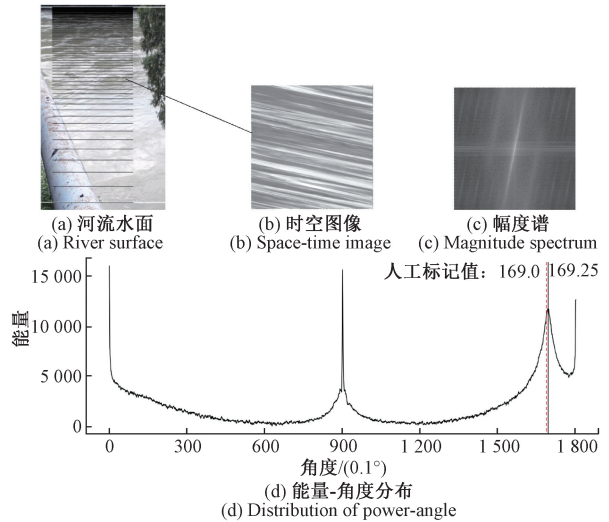


图5 正常

Fig. 5 Normal

3.3 紊 流

当设置的测速线位于河流两岸边坡附近时,河流冲击边坡形成流速、流向脉动强烈的紊流(如图6所示)。时空图像中的纹理特征变得模糊、纹理梯度呈现出不同

的方向,一致性变弱。该变化在频域中表现为有效谱线较正常场景下长度变短、亮度变弱,呈现出弥散形态,占据的高频分量明显变少。能量-角度分布曲线中除直流分量外无明显的信号峰值,FFT-STIV 的检测结果与人工标记值有 4.39°的偏差。

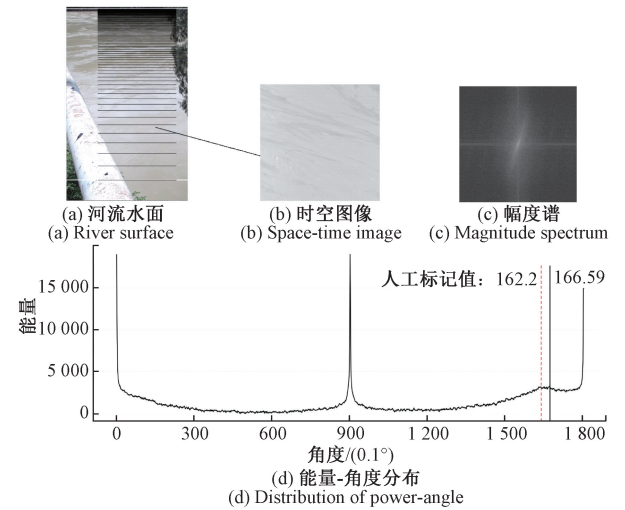


图 6 紊流
Fig. 6 Turbulence

3.4 倒影

当测速线上有河岸投射的倒影时(如图 7 所示),由于倒影在测速线上的位置不随时间发生移动,时空图像中叠加了竖直方向暗黑的条纹,但与河流运动相关的倾斜纹理特征没有被破坏,倾斜的特征依然明显。竖直方向倒影在频域中重新分布为水平方向的谱线,能量-角度分布曲线中有着较为明显的信号峰值,但信号峰值附近的曲线较为粗糙且对称性较差,FFT-STIV 检测的主方向与人工标记值偏差为 1.65°。

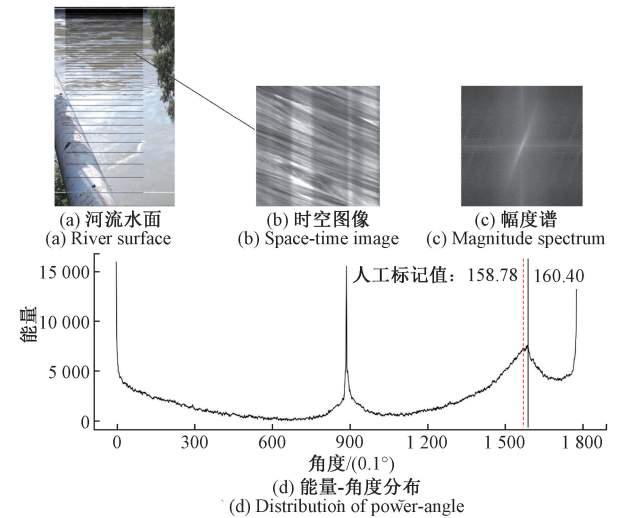


图 7 倒影
Fig. 7 Shadow

3.5 耀光

当测速线位于太阳直射的河面区域时(如图 8 所示),随水流运动的波纹反射着强烈的耀光,且时空图像叠加了静态耀光在竖直方向形成的近似过曝的白色条纹。使得频域中有效谱线亮度较弱且长度较短,而分布在频谱中心四周的噪声分量变多。此时,能量-角度分布曲线中有效信号的信噪比低,对称性差,导致 FFT-STIV 检测结果与人工标记值存在的 4.44°偏差。

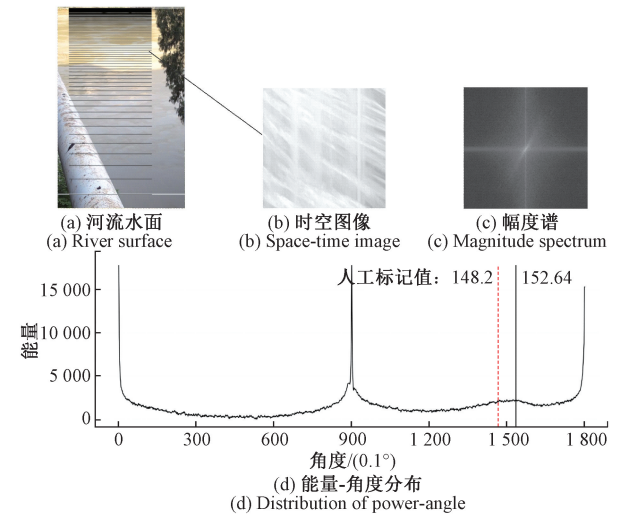


图 8 耀光
Fig. 8 Flare

3.6 障碍物

当测速线被障碍物遮挡时,如图 9(a)中的水管,时空图像中被遮挡的区域就会丢失与河流运动相关的纹理信息,产生竖直方向且显著的无用条纹,并且随着测速线被遮挡的比例增加而干扰变大。在所选测速线被水管遮挡的比例下,该竖直无用条纹,在频域中重新分布为水平明亮谱线,未对有效谱线造成明显干扰。能量-角度分布中仍然存在一个较为明显的信号峰值,此时 FFT-STIV 较准确地检测到频谱主方向。

3.7 降雨

降雨密度较低的小雨和中雨可在水面形成跟随表面水流运动的毛细波,有助于形成良好的示踪条件。而大雨场景下(如图 10 所示),高密度的雨生表面波会打破原有水面波纹的镜面反射模式,形成类似毛玻璃的漫反射,导致时空图像中的纹理模糊。在频域中体现为倾斜的谱线相较于其他场景长度最短,均集中于低频区域,且分布着大量噪声能量,信噪比较小。能量-角度分布曲线中除直流分量的峰值外整体分布十分平坦,由于靠近 90°附近的噪声能量过大,最终检测的结果与真实值之间出现较大的偏差。

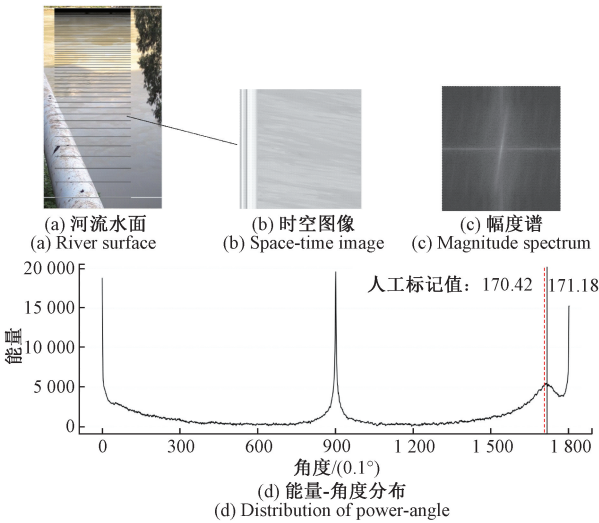


图 9 障碍物

Fig. 9 Obstacle

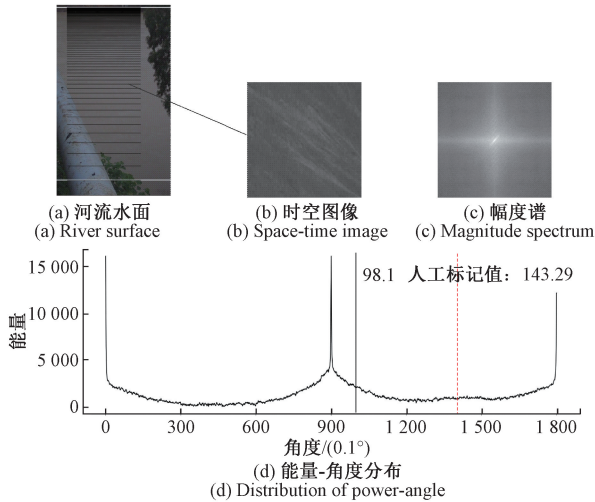


图 10 降雨

Fig. 10 Rain

4 滤波器参数敏感性分析

4.1 方向角

针对紊流、耀光以及降雨场景下 FFT-STIV 易出现粗大误差的问题,本文提出采用长度较短的椭圆作为积分区域如图 11(a)所示。长度较短的椭圆能够适应噪声引起幅度谱中与河流运动相关的谱线变短的特点,同时相比于单像素宽线段,椭圆形的积分区域面积更大能更准确地定位到有用谱线的方向。具体为:首先对幅度谱进行预处理,将通过频谱中心,方向为水平和竖直的直线上的幅值置为 0,目的是减少无用直流分量对方向角检测

的干扰。然后设置长轴为 $N/8$ 、短轴为 2 个像素值的椭圆作为积分区域,以步进 $\Delta\theta = 0.1^\circ$ 在区间 $0^\circ \sim 180^\circ$ 进行搜索,最终得到能量-角度分布如图 11(b)。相较于图 6(d),该方法得到能量-角度分布曲线中的信号峰值更明显,这意味着检测的结果会更加准确。表 1 给出直线与椭圆积分的对比结果,在 6 种场景下相较于直线积分,通过椭圆积分检测频谱主方向得到的结果整体平均精度更高,并且在耀光及降雨场景下该方法检测的结果能够很好地避免了粗大误差的发生,对噪声的干扰具有较好的鲁棒性,因此能够将该方法的检测结果作为扇形滤波器的方向角。

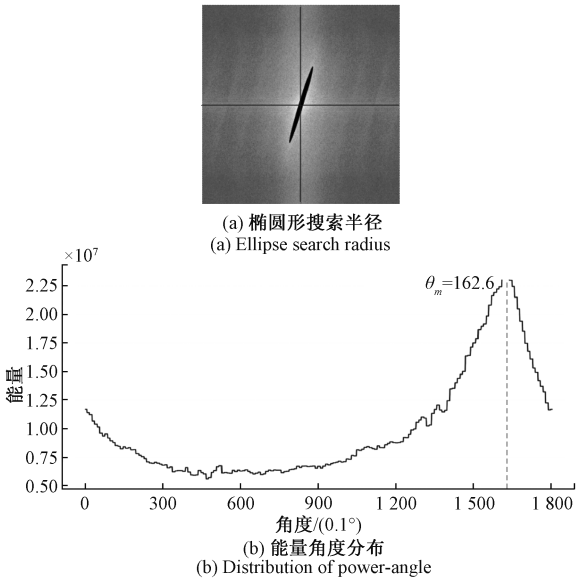


图 11 紊流场景下滤波器方向角的确定

Fig. 11 Determination of filter direction angle in turbulent scene

表 1 直线与椭圆积分的对比结果

Table 1 Comparison results of linear and elliptic integrals
($^\circ$)

场景	标记值	直线积分		椭圆积分	
		MOT	误差	MOT	误差
正常	78.95	79.25	0.30	78.60	-0.35
紊流	72.20	76.59	4.39	72.60	0.40
倒影	68.78	70.43	1.65	67.50	-1.28
耀光	58.20	62.64	4.44	58.60	0.40
障碍物	80.42	81.18	0.76	79.50	-0.92
降雨	53.29	98.10	44.81	53.50	0.21

4.2 通带夹角

对于通带夹角,设置过大时滤波器无法有效地滤波噪声,过小时则容易导致有用的谱线被滤除。因此有必要通过实验确定一个合适的通带夹角。如图 12 所示,正

常场景下的时空图像的能量-角度分布曲线中信号峰值附近的曲线近似满足一维高斯分布。当峰值下降一半时,频谱主方向 θ_m 两侧对应的角度分别为 θ_l 和 θ_r ,可以认为幅度谱中以 θ_m 为方向角且通带夹角为 $\theta_r - \theta_l$ 的扇形区域内包含了主要信号能量,因此能将 $\theta_r - \theta_l$ 作为该时空图像的通带夹角。对于其他复杂含噪场景下的时空图像,信号峰值淹没在噪声中或者信号峰值附近的曲线变得平坦使得 (θ_l, θ_r) 的角度区间被展宽,导致 $\theta_r - \theta_l$ 过大,因此复杂含噪场景下的时空图像不适合作为通带夹角实验的分析对象。

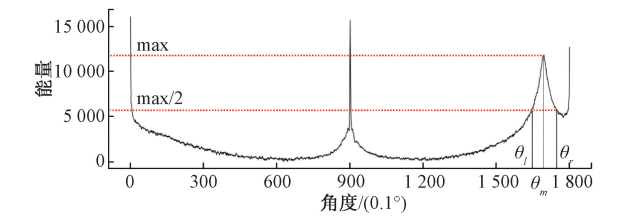


图 12 通带夹角的确定

Fig. 12 Determination of passband angle

实验中选取了 1 100 张纹理清晰的时空图像,分别确定其对应的 θ_l 和 θ_r 并进行统计分析。经统计,整体上通带夹角的角数值分布在 $6^\circ \sim 16^\circ$ 之间,最小值为 6.8° ,最大值为 15.8° ,平均值为 10.6° 。为了分析通带夹角对滤波效果的影响,采用上述三个角度进行敏感性分析实验。实验中将长度为 $N/2$ 的半径设为 R ,如图 13 所示,使用相同的方向角和滤波半径(这里设置为 R)设计不同通带夹角的滤波器。对滤波之后的时空图像进行纹理主方向检测并做误差分析,结果如表 2 所示。经计算,三个角度对应平均误差分别是 0.51° 、 0.24° 、 0.36° ,当通带夹角取 10.6° 时误差最小。当滤波半径设置为 $R/2$ 、 $R/4$ 时,两组实验结果中 3 个角度对应平均误差分别是 0.48° 、 0.22° 、 0.33° 和 0.36° 、 0.33° 、 0.34° ,依然是在通带夹角取 10.6° 时误差最小,与滤波半径为 R 时一致,因此将 $(\theta_m - 5.3^\circ, \theta_m + 5.3^\circ)$ 作为扇形滤波器的通带夹角。

表 2 通带夹角的敏感性分析结果

Table 2 Sensitivity analysis results of passband angle ($^\circ$)			
场景	6.8	10.6	15.8
正常	0.02	-0.08	-0.07
紊流	1.02	0.24	1.40
倒影	-0.82	-0.61	0.08
耀光	0.72	0.04	-0.05
障碍物	-0.44	-0.18	-0.20
降雨	0.07	0.31	0.30

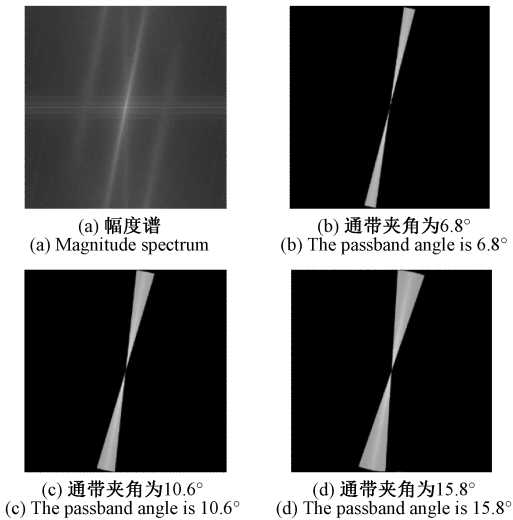


图 13 不同通带夹角的滤波器

Fig. 13 Filters with different passband angles

4.3 半 径

本节进行滤波半径的敏感性实验(实验结果如表 3 所示),在使用相同方向角和通带夹角(这里设置为 10.6°)基础上设计了不同半径的扇形滤波器,如图 14 所示。采用不同半径的滤波器分别对 6 种场景下的时空图像进行滤波,然后使用 FFT-STIV 检测滤波之后时空图像的纹理主方向并进行误差统计分析。对于经半径为 R 、 $R/2$ 、 $R/4$ 的扇形滤波器滤波后的时空图像,6 种场景下的纹理主方向值与人工标记值之间的平均误差分别为 0.24° 、 0.22° 、 0.34° ,半径取 $R/2$ 时误差最小。并且相较于 R 、 $R/2$ 较短能够适应含噪场景下有效谱线较短的特点,因此本文选取 $R/2$ 作为滤波器的半径。

表 3 滤波半径的敏感性分析结果

Table 3 Sensitivity analysis results of filter radius ($^\circ$)			
场景	R	R/2	R/4
正常	-0.08	-0.08	-0.17
紊流	0.24	0.28	0.04
倒影	-0.61	-0.48	-0.88
耀光	0.04	-0.01	-0.12
障碍物	-0.18	-0.30	-0.34
降雨	0.31	0.21	-0.50

4.4 MOT 检测

为了验证所选滤波器参数的有效性,采用频域扇形滤波器对所选六种场景下的时空图像(图 6(a)~图 10(a))进行滤波和 MOT 检测,结果如图 15 和表 4 所示。可以看出,各场景下滤波后时空图像的纹理清晰程度相较于滤波前都有了明显改善,特别是图像中的倒影、

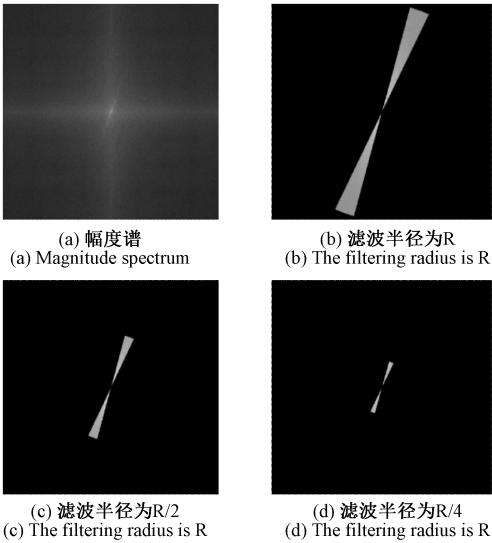


图 14 不同半径的滤波器
Fig. 14 Filters with different radius

耀光、障碍物等静态背景噪声几乎被完全滤除,使得正常场景下 MOT 的检测精度达到 0.1°以内,在复杂场景下的达到 0.5°以内。

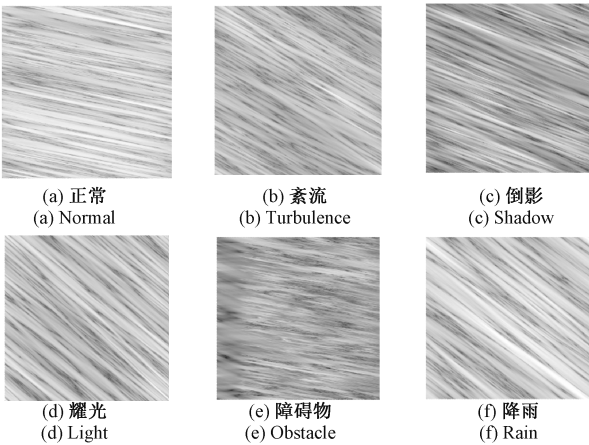


图 15 滤波后的 STI
Fig. 15 STI after filtering

表 4 MOT 的检测精度
Table 4 Detection accuracy of MOT (°)

场景	滤波前	滤波后
正常	0.30	-0.08
紊流	4.39	0.28
倒影	1.65	-0.48
耀光	4.44	-0.01
障碍物	0.76	-0.37
降雨	44.81	0.21

5 流速比测实验

为了验证方法应用于实际流速测量的有效性,于 2020 年 8 月 21 日 8 点 25 分到 9 点 25 分在攀枝花水文站开展了与目前河流流量测验规范中的标准流速仪法的比测实验。如图 16 所示,期间水位保持在 998 m,为高水条件,水流示踪物及表面流速较为稳定;天气为阴天,水面无风,也无明显耀光干扰。实验采用 9 点拍摄的一段 30 s 视频测量了起点距 55~175 m 的 9 条测速线,包含了正常(2、3、4)、近岸紊流(1、9)、倒影(6、7、8、9)及障碍物(5、6、7、8、9)场景,对应的时空图像如图 17 所示。

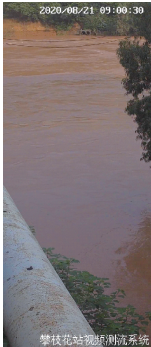


图 16 比测实验条件
Fig. 16 Conditions of comparative test

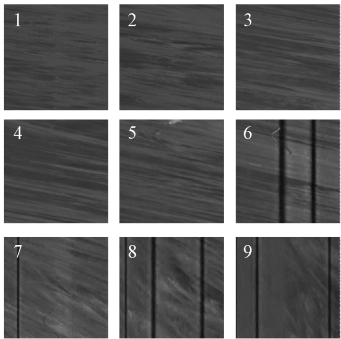


图 17 时空图像
Fig. 17 STIs

从表 5 中的 MOT 检测结果可以看出,正常场景下的误差最小,障碍物及倒影场景下误差略大,总体变化范围与表 4 结果相符。测速线 5 和 6 尽管分别受到铅鱼流速仪与黑色线缆的局部遮挡,但由于中泓区域流速稳定、示踪物形成的图像纹理清晰且一致性较好,因此滤波前后差别不大。测速线 7、8 在受到线缆遮挡的同时存在对岸倒影的干扰,导致误差更大;测速线 9 位于图像分辨率较低的远场,且同时受到 3 种干扰因素的影响,导致误差最大;所设计的频域滤波器能够有效滤除噪声干扰,将误差控制在 0.4°以内。

为保证流速仪法测量的稳定性,其转子应完全入水,因此实际测量了水深为 0.2 m 的流速作为比测参考值。从图 18 可以看出,相比流速仪法,滤波后的断面流速分布呈现出趋势相同但数值略偏大的规律。这是由于 STIV 测量的是表面水流,与流速仪法所测的水深之间存在一个乘性的流速系数,由对数或指数型河道垂线流速分布规律所决定^[22]。这里用各垂线流速系数的均值 0.93 对滤波后的流速进行校正,得到相对误差范围为 0.1%~9.2%,如表 5 所示。其中最大误差 9.2% 出现在测速线 1 处,由于 MOT 检测值和目测值的误差为 0.11°,在合理范围内,判断其主要误差源于紊流引起铅鱼偏角

过大导致流速仪测量值偏小。其余测速线对应的流速相对误差在 6.2% 以内。

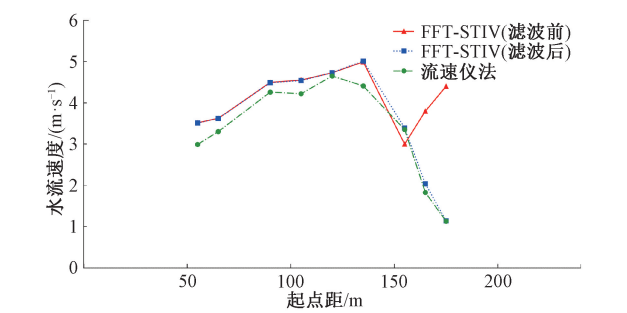


图 18 表面流速分布
Fig. 18 Distribution of surface velocity

表 5 MOT 及流速测量结果
Table 5 Results of MOT and velocity measurement

编号	起点距 /m	MOT/(°)			绝对误差 /(°)	流速/(m/s)				相对误差 /%
		目测值	滤波前	滤波后		滤波前	滤波后	系数校正	流速仪法	
1	55	82.60	82.71	82.71	0.11	3.51	3.51	3.26	2.99	9.2
2	65	81.54	81.66	81.66	0.12	3.62	3.62	3.37	3.30	2.0
3	90	80.69	80.61	80.61	0.08	4.49	4.49	4.17	4.26	-2.0
4	105	79.30	79.32	79.31	0.01	4.55	4.54	4.22	4.22	0.1
5	120	78.08	78.18	78.15	0.07	4.75	4.73	4.40	4.65	-5.4
6	135	77.44	77.55	77.57	0.13	4.99	5.01	4.66	4.41	5.7
7	155	69.80	67.07	69.50	0.30	2.99	3.39	3.15	3.35	-5.9
8	165	56.80	70.52	56.60	0.20	3.79	2.04	1.90	1.83	3.7
9	175	38.20	72.02	38.60	0.40	4.40	1.14	1.06	1.13	-6.2

6 结 论

鉴于现有时空图像测速技术的研究中,频域滤波方法参数敏感性分析不足导致环境适用性较差,本文通过分析 6 种典型场景下时空图像的空域及频域特性,优化了频域扇形滤波器的参数选取。结果表明:采用提出的椭圆形积分区域检测方向角优于现有的单像素宽直线;当设置通带夹角为±5.3°且半径为 R/2 时,滤波器在上述场景下均能有效地滤除噪声干扰。使得时空图像纹理主方向的检测精度在正常场景下达到 0.1°,在复杂含噪场景下控制在 0.5°以内,对应的表面流速测量误差可满足一类精度站均匀浮标法的单次测验要求。

本文所选取 6 种场景包含了攀枝花站点的绝大多数场景,但未包含大暴雨及水雾导致视频能见度极低而无法施测的条件,未来将探索采用光学图像增强方法,以及引入时空图像幅度谱的峰值拟合与有效性识别技术实现误差修正,使之适用于此类极端场景。

参考文献

[1] HERITAGE G, ENTWISTLE N, MILAN D, et al. Quantifying and contextualising cyclone-driven, extreme flood magnitudes in bedrock-influenced dryland rivers[J]. Advances in Water Resources, 2019, 123: 145-159.

[2] 杨聃,邵广俊,胡伟飞,等.基于图像的河流表面测速研究综述[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(9): 1752-1763.

YANG P, SHAO G J, HU W F, et al. A review of image-based river surface velocity measurement [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2021, 55(9): 1752-1763.

[3] 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 ZH, XU F, WANG X, et al. Research progress

- of river water surface imaging velocity measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(7): 1441-1450.
- [4] JODEAUM, HAUETA, PAQUIERA, et al. Application and evaluation of LSPIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2008, 19 (2): 117-127.
- [5] LECOZJ, HAUETA, PIERREFEUG, et al. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in mediterranean rivers [J]. Journal of Hydrology, 2010, 394 (1): 42-52.
- [6] TSUBAKI R, FUJITA I, TSUTSUMI S. Measurement of the flood discharge of a small-sized river using an existing digital video recording system [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2011, 5(4): 313-321.
- [7] DRAMAIS G, LE COZ J, CAMENEN B, et al. Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2011, 5(4): 301-312.
- [8] FUJITA I, MUSTE M, KRUGER A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications [J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(3):397-414.
- [9] FUJITA I, WATANANABE H, TSUBAKI R. Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image Velocimetry (STIV) [J]. International Journal of River Basin Management, 2007, 5(2):105-114.
- [10] MUSTE M, FUJITA I, HAUET A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments [J]. Water Resources Research, 2008, 44:W00D19.
- [11] FUJITA I, NOTOYA Y, SHIMONO M. Development of UAV-based river surface velocity measurement by STIV based on high-accurate image stabilization techniques[C]. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 2015.
- [12] FUJITA I, NOTOYA Y, TANI K, et al. Efficient and accurate estimation of water surface velocity in STIV[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2019, 19 (10): 1363-1378.
- [13] ZHEN Z, HUABAO L, YANG Z, et al. Design and evaluation of an FFT-based space-time image velocimetry (STIV) for time-averaged velocity measurement [C]. 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, IEEE, 2019.
- [14] 赵浩源, 陈华, 刘维高, 等. 基于河流表面时空图像识别的测流方法 [J]. 水资源研究, 2020, 9(1): 1-11.
- ZHAO H Y, CHEN H, LIU W G, et al. Flow measurement method based on space-time image recognition of river surface [J]. Water Resources Research, 2020, 9(1):1-11.
- [15] HZ A, HUA C A, BI A, et al. An improvement of the space-time image Velocimetry combined with a new denoising method for estimating river discharge [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 77(3): 101864.
- [16] SHEKHAR, CHANDRA, IMANTS, et al. Exact image representation via a number-theoretic radon transform[J]. Iet Computer Vision, 2014, 8 (4): 338-346.
- [17] 王慧斌, 董伟, 张振, 等. 基于时空图像频谱的时均流场重建方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 623-631.
- WANG H B, DONG W, ZHANG ZH, et al. Time-averaged flow field reconstruction method based on space-time image spectrum [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3):623-631.
- [18] 张振, 王慧斌, 严锡君, 等. 时空图像测速法的敏感性分析及不确定度评估 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7):1763-1771.
- ZHANG ZH, WANG H B, YAN X J, et al. Sensitivity analysis and uncertainty evaluation of space-time image velocimetry method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1763-1771.
- [19] FUJITA I, SHIBANO T, TANI K. Application of masked

- two-dimensional Fourier spectrum for improving measurement accuracy of river surface flow [C]. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 2019.
- [20] 梁莉莉,叶石火,石光明.具有任意方向的扇形滤波器及其在图像方向检测中的应用(英文)[J].光子学报, 2011,40(12):1815-1819.
- LIANG L L, YE SH H, SHI G M. Fan filter with arbitrary direction and its application in image direction detection (English) [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(12): 1815-1819.
- [21] 张振,吕莉,石爱业,等.基于物像尺度变换的河流水面流场定标方法[J].仪器仪表学报, 2017, 38(9):2273-2281.
- ZHANG ZH, LYU L, SHI AI Y, et al. River surface flow field calibration method based on object image scale transformation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9):2273-2281.
- [22] 付辉,杨开林,王涛,等.对数型流速分布公式的参

数敏感性取值[J].水利学报, 2013, 44(4): 489-494.

FU H, YANG K L, WANG T, et al. Parameter sensitivity and value of logarithmic velocity distribution formula [J]. Water Conservancy, 2013, 44 (4): 489-494.

作者简介



张振(通信作者),2007年于河海大学获得学士学位,2013年于河海大学获得博士学位,现为河海大学副教授,主要研究方向为光电成像与多传感器系统、计算机视觉与数字图像处理、图像法测流技术等。

E-mail: zz_hhuc@163.com

Zhang Zhen (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Hohai University in 2007 and 2013, respectively. He is currently an associate professor at Hohai University. His main research interests include optical imaging and multi-sensor system, computer vision and digital image processing, image-based flow measurement.