

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.02.004

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:倪云昆,吴慎将,张高迪,王可暄.高速小微物体多普勒信号联合解调算法研究[J].西安理工大学学报,2026,42(2):187-196.

Ni Yunkun, Wu Shenjiang, Zhang Gaodi, Wang Kexuan. Research on joint demodulation algorithm for high-speed small flyer Doppler signals[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(2): 187-196.

# 高速小微物体多普勒信号联合解调算法研究

倪云昆<sup>1,2</sup>, 吴慎将<sup>1</sup>, 张高迪<sup>1</sup>, 王可暄<sup>2</sup>

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 陕西应用物理化学研究所 陕西 西安 710061)

**摘要:**光子多普勒测速系统(photon Doppler velocimetry, PDV)因其高精度和快速响应特性,在测量高速运动物体的速度方面具有重要应用。针对PDV信号利用传统信号解调方法进行速度解算时误差较大的问题,本文提出了一种信号联合解调算法。该算法首先对小飞片原始多普勒信号进行小波阈值去噪和小波分解,随后对分解后的低频信号利用小波变换、高频信号利用短时傅里叶变换进行时频分析,再经过时频图预处理、差频曲线提取及整合、曲线平滑后最终解算出速度。实验结果表明,高频部分以短时傅里叶变换做参照,该算法的平均偏差率相比小波变换降低了1.13%;低频部分以小波变换做参照,该算法的平均偏差率为1.26%,而短时傅里叶变换缺失了速度从0 m/s到250 m/s的一段。本文的研究成果为PDV系统在复杂动态测量下的速度解调方法提供了新的思路和理论支持。

**关键词:**光子多普勒测速;小波阈值去噪;小波分解;时频分析;速度解算

**中图分类号:** TN29; TN911.74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2026)02-0187-10

## Research on joint demodulation algorithm for high-speed small flyer Doppler signals

Ni Yunkun<sup>1,2</sup>, Wu Shenjiang<sup>1</sup>, Zhang Gaodi<sup>1</sup>, Wang Kexuan<sup>2</sup>

(1. School of Opto-electronic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China;

2. Shaanxi Institute of Applied Physical Chemistry, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Photon Doppler velocimetry (PDV) has important applications in measuring the speed of high-speed moving objects due to its high precision and fast response. Aiming at the problem of large errors in calculating the speed of PDV signals using traditional signal demodulation methods, this paper proposes a signal joint demodulation algorithm. The algorithm first performs wavelet threshold denoising and wavelet decomposition on the original Doppler signal of the small flying piece, then uses the wavelet transform and short-time Fourier transform to perform a time-frequency analysis of the decomposed low-frequency signal and high-frequency signal, and finally calculates the speed after time-frequency graph preprocessing, difference frequency curve extraction and integration, and curve smoothing. The experimental results show that the average deviation rate of the algorithm is 1.13% lower than that of the wavelet transform when the high-frequency part is referenced by the short-time Fourier transform; the average deviation rate of the algorithm is 1.26% when the low-frequency part is referenced by the wavelet transform, and the short-time Fourier transform lacks a speed section from 0 m/s to 250 m/s. The research results

收稿日期: 2024-10-16; 网络首发日期: 2025-03-17

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250314.1544.004>

基金项目: 应用物理化学重点实验室开放课题基金资助项目(WDYX23614260206)

第一作者: 倪云昆,男,硕士生,研究方向为PDV测速技术与信号处理等。E-mail: nykun3881456@163.com

通信作者: 吴慎将,男,教授,研究方向为薄膜技术与光学检测、激光与物质相互作用、火工品性能研究与测试等。E-mail: wsj@xatu.edu.cn

of this paper provide the new ideas and theoretical support for the velocity demodulation method of the PDV system in the complex dynamic measurement.

**Key words:** photon Doppler velocimetry; wavelet threshold denoising; wavelet decomposition; time-frequency analysis; velocity solution

光子多普勒测速技术<sup>[1]</sup> (photon Doppler velocimetry, PDV) 是一种高速小微物体或冲击波测速技术, 广泛应用于高速碰撞<sup>[2]</sup>、爆炸<sup>[3]</sup> 和冲击波传播<sup>[4]</sup> 等动态现象研究中, 具有高精度、非接触和瞬态测量等优点<sup>[5]</sup>。然而在进行小飞片测速实验时, 利用 PDV 系统得到的原始多普勒信号仍会受到环境噪声和系统噪声的影响, 导致信号噪声大、信噪比低、稳定性差。传统信号解调方法在原始多普勒信号频带宽度较大时难以涉及到低频和高频的全部信息, 速度解算的偏差较大, 甚至会出现缺失<sup>[6]</sup>。

信号处理是 PDV 测速的核心之一, 其速度解调的精度关系到 PDV 系统的可靠性。短时傅里叶变换和小波变换是目前普遍采用的信号解调算法<sup>[7]</sup>, 在对原始多普勒信号进行时频分析上具有绝对的优势。刘鲁缘等<sup>[8]</sup> 提出了聚类-短时傅里叶变换, 吴同等<sup>[9]</sup> 提出了两阶段短时傅里叶变换, 均作为对传统算法的改进, 可是只适用于 PDV 测振领域。戴景钊等<sup>[10]</sup> 分析了四种不同的 PDV 信号解调方法并进行了对比。孙艺圃等<sup>[11]</sup> 研究了采样频率和滤波方法对 PDV 测速误差的影响。梅迪等<sup>[12]</sup> 改进了对微弱多普勒信号的时频图进行差频曲线提取的方法, 但时频分析仍然采用短时傅里叶变换。

为了解决短时傅里叶变换对低频信号的处理效果较差、小波变换对高频信号的处理效果较差的问题, 本文提出了一种信号联合解调算法。该方法首先对原始多普勒信号进行小波阈值去噪, 然后对去噪信号利用小波分解分离出低频信号和高频信号, 再对低频信号进行小波变换、高频信号进行短时傅里叶变换后得到各自的时频图, 通过时频图预处理提高图像的对比度, 随后提取出各自的差频曲线再进行整合, 对整合后的曲线进行平滑处理, 最终通过多普勒频移公式解算出目标物体的速度。信号联合解调算法相比短时傅里叶变换和小波变换同时兼顾了原始多普勒信号的低频部分和高频部分, 使得最终解算出的目标物体速度更加精确。

## 1 PDV 测速原理与系统搭建

### 1.1 PDV 测速原理

PDV 测速技术基于光子多普勒效应<sup>[13]</sup>。普通的单通道 PDV 由 1 550 nm 激光器、光纤环形器、光纤分束器、光衰减器、耦合器、光电探测器、示波器、

光纤探头和法兰组成。系统光路示意图见图 1。

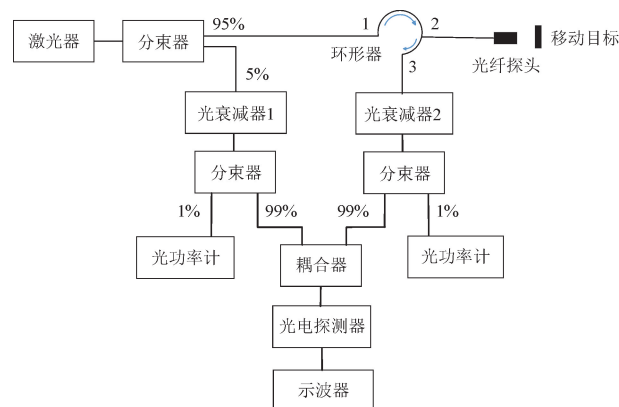


图 1 单通道 PDV 系统光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical path of a single-channel PDV system

PDV 系统光路的原理如下: 激光器发射出 1 550 nm 的连续激光(频率  $f_0$ ), 经过 95 : 5 的分束器后被分成了两束光, 其中 95% 的那一路作为信号光, 5% 的那一路作为参考光。信号光通过环形器(1 进 2 出)后到达光纤探头, 从而出射后照射在移动目标上。当目标以速度  $v$  飞向探头时, 目标表面的反射信号光(频率  $f_s$ )相对于入射信号光会产生频率漂移, 即多普勒频移  $f_d$ , 频移和目标速度密切相关<sup>[14]</sup>。在垂直入射下信号光产生的多普勒频移  $f_d$  为:

$$f_d = 2v/\lambda \quad (1)$$

式中:  $v$  为目标物体速度;  $\lambda$  为激光波长。反射信号光被探头接收后再次通过环形器(2 进 3 出), 又经过光衰减器 2 和 99 : 1 的分束器后被分成了两束光, 其中 1% 的作为检测光, 通过光功率计读取其功率值, 从而反推出反射信号光的功率值。如果反射信号光功率过大可以通过调节光衰减器 2 使其功率降低。参考光经过光衰减器 1 和 99 : 1 的分束器后同样被分成了两束光。随后 99% 的参考光和反射信号光进入耦合器耦合后得到的干涉光光强  $I(t)$  为:

$$I(t) = I_0 + I_s + 2\sqrt{I_0 I_s} \cos(2\pi f_d t + \varphi) \quad (2)$$

式中:  $I_s$  为反射信号光光强;  $I_0$  为参考光光强;  $\varphi$  为两者相位差。耦合后的干涉光进入光电探测器, 从而转换为模拟电压信号。光电探测器的输出电压信号  $V(t)$  为:

$$V(t) = k\{I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \times \cos[2\pi \int_0^t f_d(t) dt + \varphi_2 - \varphi_1]\} + V_n(t) \quad (3)$$

式中:  $k$  为光电探测器的响应度;  $I_1$  和  $I_2$  为参考光和反射信号光的光强;  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  为参考光和反射信号光的相位;  $V_n(t)$  为光电探测器产生的噪声。将原始多普勒信号利用示波器记录,通过进一步的信号处理和速度解算即可得到目标物体的速度曲线。

## 1.2 PDV 系统搭建及实验

根据 PDV 系统的设计图结合所需器件搭建了实物。激光器采用单频光纤激光器,波长 1 550 nm,线宽 2.29 kHz,最大输出功率 1 W。光电探测器采用美国进口 Model 1544-B 高速光电探测器,类型为 InGaAs,带宽 12 GHz,输出噪声 2.8 mVrms,饱和功率 0.7 mW。使用该系统测量金属桥箔电爆炸驱动的小飞片速度,小飞片材料为碳酸聚酯,尺寸(直径×厚度)为 0.5 mm×12.5 μm。做测速实验时的现场图见图 2。

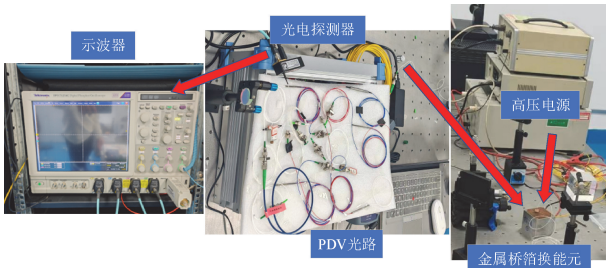


图 2 单通道 PDV 系统测速实验图

Fig. 2 Single-channel PDV system speed measurement experiment diagram

实验在超净室进行。实验装置由激光器、PDV 光路、光电探测器、示波器、金属桥箔电爆炸换能元、装载光纤探头的工装夹具和高压电源组成。金属桥箔电爆炸换能元主要由电极、电极基底、金属桥箔、绝缘薄膜、微尺寸飞片、加速腔和壳体组成。将光纤探头垂直插入到工装夹具的开孔里,调整位置使探头端面距离工装夹具外平面 2~3 mm 后固定住。金属桥箔电爆炸换能元和工装夹具通过支架固定在平台上,调整相对位置,使加速腔中心孔与光纤探头对准。实验时设置激光器输出功率为 200 mW,设置示波器为触发模式,通过高压电源对电容进行充电,电容随后释放大脉冲电流,激发金属桥箔发生电爆炸,剪切并驱动小飞片高速运动。小飞片从 0 m/s 开始加速,最高速度与高压电源输出的电压值成正比,最后撞到光纤探头上停止。本实验测量的是小飞片的一维速度,其速度方向垂直指向光纤探头的端面。实验得到的其中一组原始多普勒信号见图 3。图中

时间为 0 的时刻对应示波器触发的时刻,负值对应触发前的信号,正值对应触发后的信号。

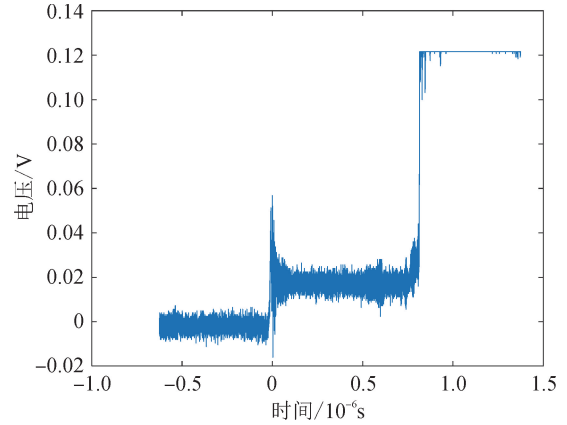


图 3 小飞片测速原始多普勒信号

Fig. 3 Original Doppler signal of small flying piece velocity measurement

## 2 传统信号解调方法

目前在 PDV 测速领域最常用的传统信号解调方法有短时傅里叶变换法和小波变换法。下面对这两种算法进行介绍。

### 2.1 短时傅里叶变换法

短时傅里叶变换<sup>[15]</sup> (short-time Fourier transform, STFT) 是一种常用的时频分析方法,适用于处理非平稳信号。STFT 的核心是在傅里叶变换的基础上加入分窗操作,基本思想是对信号进行分段处理,即通过一个可移动的窗函数将信号分成多个短时间片段,然后对每个片段进行傅里叶变换。这使得 STFT 能够同时提供信号在时间和频率上的信息,其数学表达式为:

$$X(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \omega(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

式中:  $x(\tau)$  是时域信号;  $\omega(\tau - t)$  是以  $t$  为中心的窗函数;  $\omega$  是频率变量;  $j$  是虚数单位。窗函数  $\omega(t)$  用来截取信号的局部片段。  $X(t, \omega)$  是一个复数值函数,描述了信号在  $t$  时刻的频率成分。

STFT 的关键是  $\omega(t)$  的选择。由于计算 STFT 的频谱需要利用固定宽度的滑动窗口,所以其时间分辨率  $\Delta t$  和频率分辨率  $\Delta f$  要满足海森堡不确定性原理:

$$\Delta t \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (5)$$

故  $\omega(t)$  无法同时兼顾时域和频域信息。一般较窄的窗函数时间分辨率更高,但频率分辨率较低;较宽的窗函数频率分辨率更高,但时间分辨率较低。针对原始多普勒信号的性质和特点,选择汉明窗作

为窗函数,窗口宽度设置为 256,FFT 点数取 2 048,采样频率为 7 GHz,对图 3 中的原始多普勒信号利用 STFT 进行时频分析,得到的时频图见图 4。

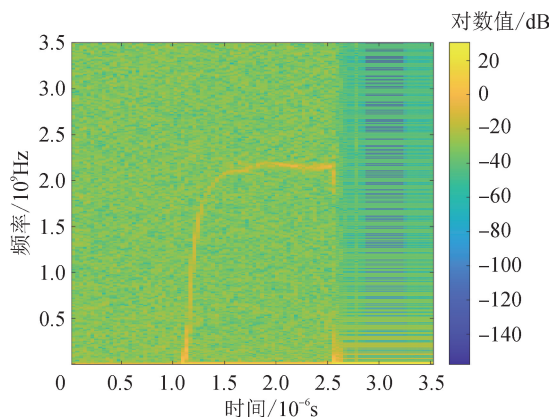


图 4 短时傅里叶变换时频图

Fig. 4 Short-time Fourier transform time-frequency diagram

STFT 的最大优势在于能够提供信号中随时间变化的频率成分,此外其计算方法仍然基于傅里叶变换,实现起来相对简单。然而 STFT 的主要局限是不可能同时获得高时间分辨率和高频率分辨率,而且 STFT 的性能高度依赖于窗函数的选择,更适用于信号在窗函数范围内大致平稳的情况。

## 2.2 小波变换法

小波变换<sup>[16]</sup> (wavelet transform, WT)是另外一种常用的时频分析方法,同样适用于处理非平稳信号。与 STFT 不同,WT 能够在不同的时间尺度上分析信号,提供同时具有高时间分辨率和高频率分辨率的时频信息。与傅里叶变换的正弦基不同,WT 使用的基函数是由母小波函数生成的。母小波  $\phi(t)$  是一个具有有限支集或快速衰减的函数,通过对母小波进行平移和尺度变换,可以生成一组小波基函数。WT 的基本思想是通过一组小波基函数和信号进行卷积,从而实现对信号的多尺度分解和局部特征提取。连续小波变换 (CWT) 的数学表达式为:

$$W_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (6)$$

式中:  $x(t)$  是时域信号;  $\phi(t)$  是母小波函数;  $a$  是尺度因子,控制小波的压缩或拉伸,决定了频率分辨率;  $b$  是平移因子,控制小波在时间轴上的移动,决定了时间位置;  $W_x(a, b)$  是小波变换系数,反映了信号  $x(t)$  在尺度  $a$  和时间  $b$  处的局部特征。

针对原始多普勒信号的性质和特点,小波基函数选择 cmor3-3 小波,尺寸序列的长度设置为 256,采样频率为 7 GHz,对图 3 中的原始多普勒信号进

行连续小波变换,可得到如图 5 所示的时频图。

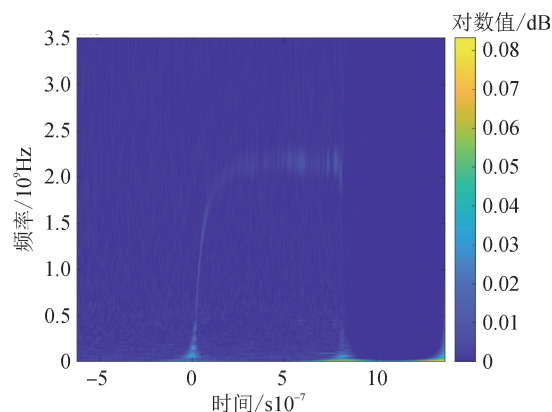


图 5 连续小波变换时频图

Fig. 5 Continuous wavelet transform time-frequency diagram

WT 的最大优势在于具有多尺度分析能力,可以灵活调整分析的时间分辨率和频率分辨率。与 STFT 相比 WT 具有良好的时域和频域局部化能力,可以准确定位信号中的突变或瞬时特征。然而相比于 STFT,WT 的主要缺点是计算复杂度较高,特别是在处理高维信号时的计算时间和资源消耗较大。

## 3 PDV 信号联合解调算法

本实验中待测物体速度范围较大,导致原始多普勒信号的频带宽度较大,因此原始多普勒信号包含低频和高频信息。本研究为了降低待测物体速度解算的误差,提出了信号联合解调算法,分离出原始多普勒信号的低频和高频部分,并对其进行处理最终解算出速度。该算法具体步骤见图 6。

### 3.1 小波阈值去噪

小波阈值去噪<sup>[17]</sup> 是一种基于小波变换的信号去噪技术,其利用小波基函数和阈值函数对信号进行处理,在去除噪声的同时,能够保留信号的主要特征,最后通过小波逆变换更好的还原出真实的信号。

对图 3 的原始多普勒信号进行小波阈值去噪。当原始多普勒信号的信噪比较高时,选择‘sym8’小波作为小波基函数,分解层数设置为 5 层,选择去噪比较保守的无偏风险估计阈值作为阈值函数,搭配软阈值处理,更好地保留真实的信号,去噪结果见图 7(a)。当原始多普勒信号的信噪比较低时,选择‘db4’小波作为小波基函数,分解层数设置为 3 层,选择去噪比较彻底的固定阈值作为阈值函数,搭配硬阈值处理,更好地去除噪声,去噪结果见图 7(b)。

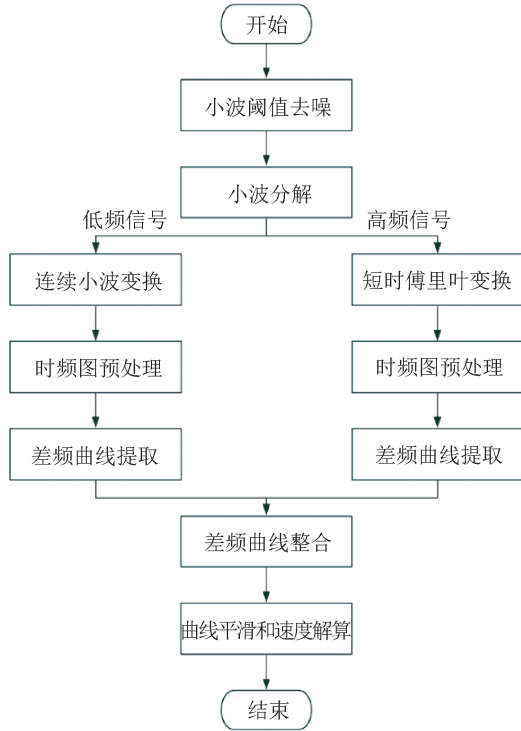


图6 信号联合解调算法步骤图

Fig. 6 Signal joint demodulation algorithm steps diagram

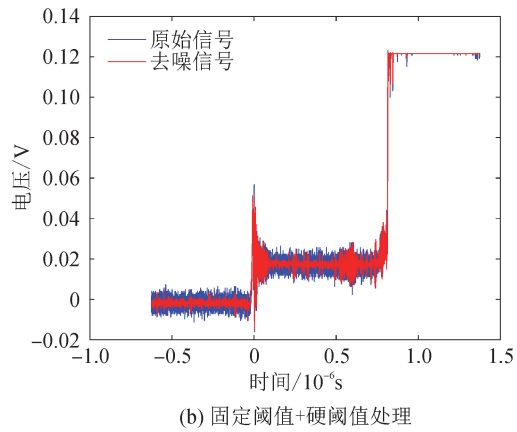
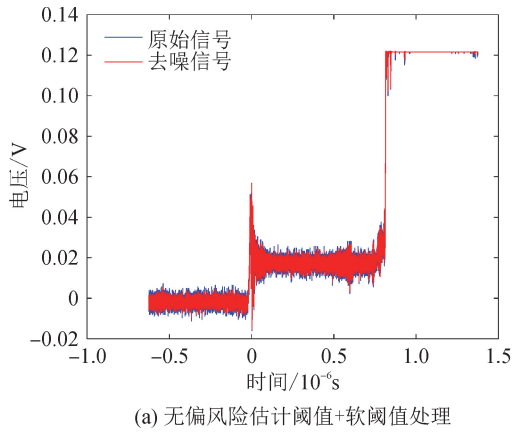


图7 去噪后的信号和原始信号对比

Fig. 7 Comparison of denoised signal and original signal

### 3.2 小波分解

小波分解<sup>[17]</sup>是一种信号处理方法,通过使用小波基函数对信号进行分解,得到多个不同频率的子信号,每一个子信号都包含了原信号不同时间尺度下的特征。小波分解可以将信号划分为近似成分和细节成分,近似成分反映信号的低频部分,细节成分反映信号的高频部分。通过小波逆变换将多尺度近似系数和细节系数组合起来,恢复成低频信号和高频信号。

针对去噪信号的特点,‘sym4’小波能够在保证信号分析精度的同时,提供较好的平滑性和紧支撑

通过计算去噪信号的信噪比以定量分析去噪效果。信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)用于定量描述信号相对于噪声的强度,通常表示为分贝(dB)值,计算公式为:

$$R = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \quad (7)$$

式中:  $R$  为信噪比(dB);  $P_{\text{signal}}$  为信号的功率;  $P_{\text{noise}}$  为噪声的功率。对于原始多普勒信号,经过小波阈值去噪后的信号功率和噪声功率可以表示为:

$$P_{\text{signal}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{\text{signal}}(i)^2 \quad (8)$$

$$P_{\text{noise}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{\text{noise}}(i)^2 \quad (9)$$

式中:  $x_{\text{signal}}(t)$  为去噪信号;  $x_{\text{noise}}(t)$  为噪声;  $N$  为采样点总数。通过以上公式可以计算出图 7(a) 中的去噪信号的信噪比为 37.93 dB, 图 7(b) 中的去噪信号的信噪比为 30.17 dB。去噪信号的信噪比越小, 说明原始多普勒信号的噪声越大, 即去噪时去除的噪声越多, 去噪效果越好。

性, 适合分离信号中的低频成分和高频成分。分解层数的选择取决于信号的采样频率、信号的频率范围以及需要分离的频率成分。一般分解层数越高, 分解后的细节成分所对应的频带越低。对于 PDV 信号, 通常选择 3~5 层的分解。经过测试当分解层数为 4 层时分离出的低频部分和高频部分的效果最好。对图 7(b) 中的去噪信号进行小波分解得到的低频信号和高频信号见图 8。

### 3.3 时频分析

分离出去噪信号的低频部分和高频部分之后, 利用连续小波变换对图 8 中的低频信号进行时频分

析,得到的时频图见图 9(a)。利用短时傅里叶变换对图 8 中的高频信号进行时频分析,得到的时频图

见图 9(b)。

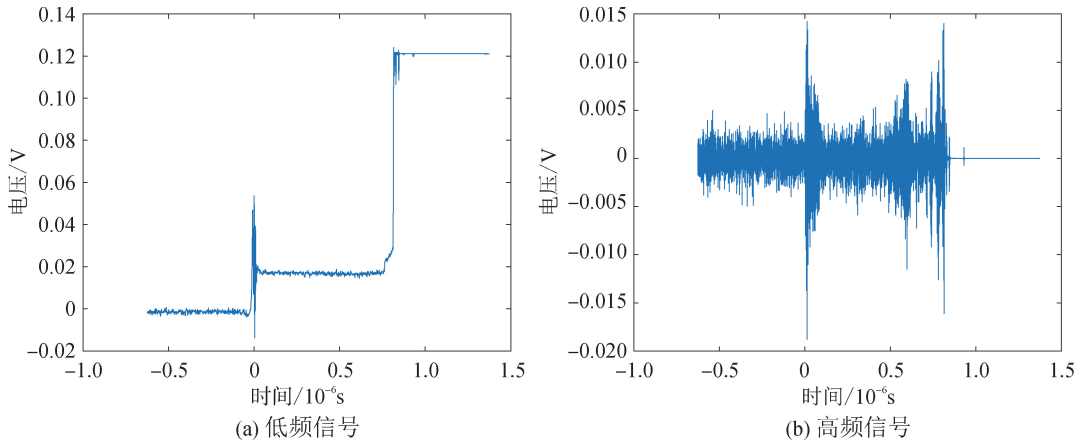


图 8 对去噪信号进行小波分解后的低频信号和高频信号

Fig. 8 Low-frequency signal and high-frequency signal after wavelet decomposition of denoised signal

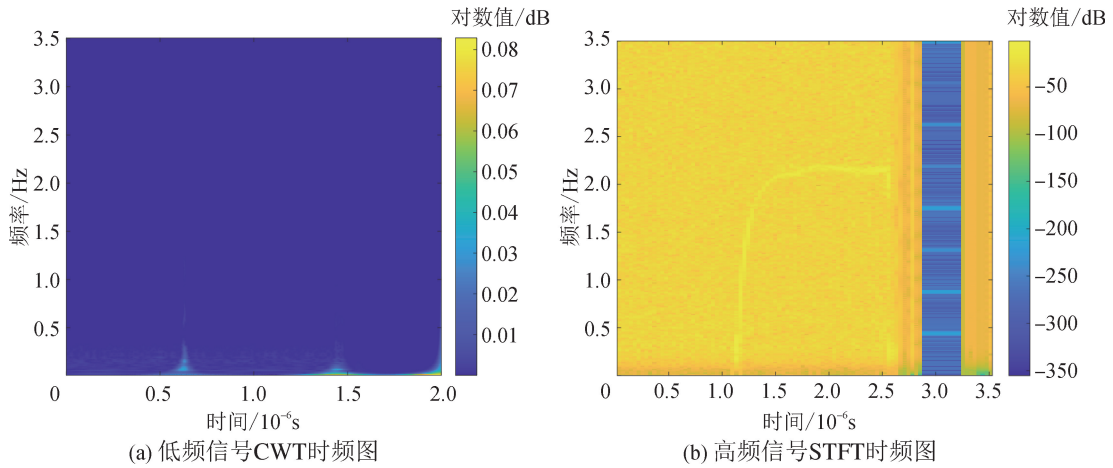


图 9 低频信号和高频信号的时频图

Fig. 9 Time-frequency diagrams of low-frequency signal and high-frequency signal

### 3.4 时频图预处理

如果原始多普勒信号比较微弱,经过时频分析后得到的时频图中图像对比度不高,视觉清晰度较低,会对下一步的差频曲线提取造成很大影响,所以首先需要对时频图进行预处理。时频图预处理<sup>[18]</sup>分为两步,首先设置功率谱密度强度阈值以提高频率分辨率,随后使用直方图均衡增强图像对比度。

#### 3.4.1 设置功率谱密度强度阈值

功率谱密度是时频图中展示信号能量在不同频率中分布的一个重要指标。功率谱密度的计算公式为:

$$P(t, f) = |S(t, f)|^2 \quad (10)$$

式中  $S(t, f)$  是通过 STFT 或 CWT 得到的时频表示,它是一个复数,表示信号在某个时刻  $t$  和频率  $f$  下的频率分量。随后可设定一个功率谱密度强度阈

值  $T$ ,将功率谱密度低于该阈值的成分抑制,仅保留主要的频率成分。通过设定合理的阈值  $T$ ,可以有效地提升时频图的频率分辨率,使得信号的主要频率成分更加突出,从而改善后续处理的效果。

#### 3.4.2 直方图均衡

直方图均衡通过调整时频图灰度值的分布,使得时频图的整体灰度分布更加均匀,从而提升时频图的全局对比度。直方图均衡的公式为:

$$I'(x, y) = \text{round}\left(\frac{L-1}{N} \sum_{i=0}^{I(x, y)} h(i)\right) \quad (11)$$

式中:  $h(i)$  是灰度值为  $i$  的像素数;  $L$  是灰度级数;  $N$  是图像的总像素数;  $I(x, y)$  是原始灰度值;  $I'(x, y)$  是均衡后的灰度值;  $\text{round}()$  是四舍五入取整函数。对图 9 中低频信号和高频信号的时频图进行预处理,得到增强后的时频图见图 10。

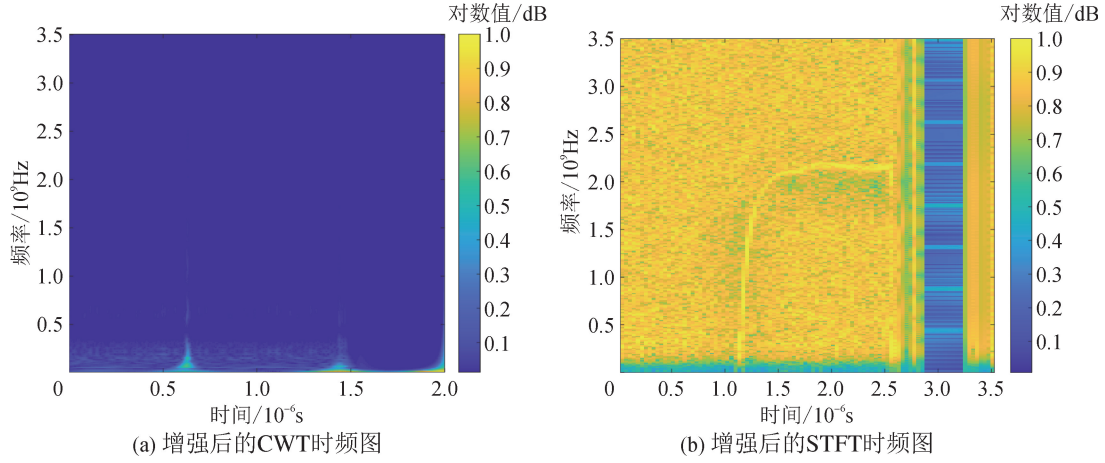


图 10 频谱预处理后的时频图

Fig. 10 Time-frequency diagrams after spectrum preprocessing

### 3.5 差频曲线提取和整合

对时频图进行预处理后就需要从功率谱能量矩阵中提取得到多普勒信号的差频频率。时频图的颜色深浅代表了功率谱能量密度的分布情况。在时频图中针对每个时间点识别出具有最大功率谱密度的频率分量作为峰值频率。这个最大频率点对应的是该时刻的主频,即多普勒频移。利用极大值提取

法<sup>[19]</sup>进行差频频率提取的公式为:

$$f_{\text{peak}}(t) = \arg \max_f |S(t, f)| \quad (12)$$

式中  $S(t, f)$  表示信号在某个时刻  $t$  和频率  $f$  下的频率分量。将每个时刻提取出的频率峰值  $f_{\text{peak}}(t)$  连接成曲线,即可得到完整的差频频率曲线。对图 10 中低频信号和高频信号的时频图进行差频频率提取后得到的差频曲线见图 11。

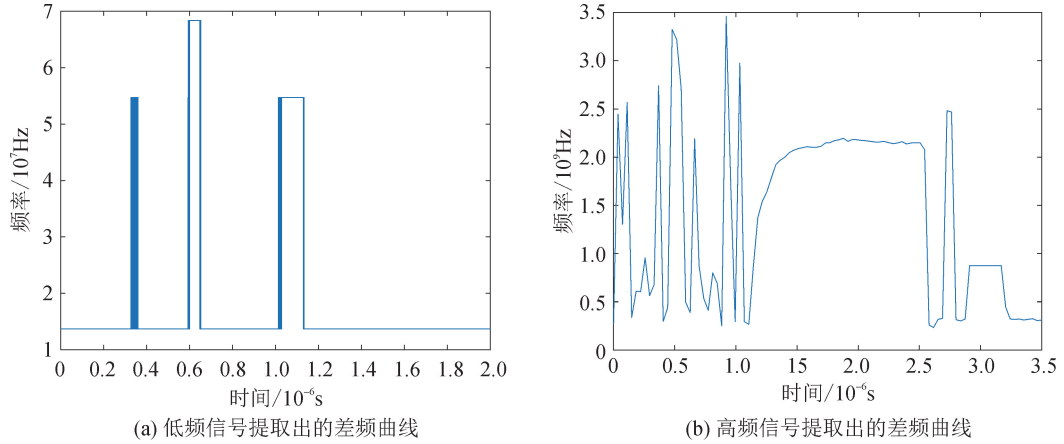


图 11 低频信号和高频信号的差频曲线

Fig. 11 Difference frequency curves of low-frequency signal and high-frequency signal

将这两部分差频曲线整合到一起,以形成一个完整的差频曲线。低频信号的差频曲线反映了目标物体的低速运动,高频信号的差频曲线反映了目标物体的高速运动。由于低频信号和高频信号时频图的时间轴不同,需要首先将两者进行时间对齐。通常可以通过插值将其中一个信号的时间轴转换到与另一个信号相匹配的时间轴上。假设  $t_{\text{low}}$  和  $t_{\text{high}}$  是两条差频曲线的时间轴,可以对  $f_{\text{high}}(t)$  进行插值,使其对应的时间轴与  $t_{\text{low}}$  一致:

$$f'_{\text{high}}(t) = \text{interp}(f_{\text{high}}(t), t_{\text{high}}, t_{\text{low}}) \quad (13)$$

对齐后的两部分差频曲线可以通过加权平均法

进行整合。加权平均时低频信号和高频信号可以根据其频率贡献进行组合:

$$f_{\text{combined}}(t) = w_{\text{low}} f_{\text{low}}(t) + w_{\text{high}} f'_{\text{high}}(t) \quad (14)$$

式中  $w_{\text{low}}$  和  $w_{\text{high}}$  是权重系数。得到的整合后的最终差频曲线见图 12。

### 3.6 曲线平滑与速度解算

得到最终差频曲线后,需要将两端无效的噪声信号去除,中间真正有用的信号可以利用曲线平滑算法对其进行平滑处理。本文使用 Savitzky-Golay 滤波器通过在移动窗口内进行多项式拟合来实现平滑处理。滤波器的关键参数包括窗口长度和多项式阶

数,设置这些参数时需要根据信号特征进行合理选择。经过测试选择将窗口长度设置为 5,多项式阶数设置为 4,此时 Savitzky-Golay 滤波器能够更加有效地平滑曲线,同时保留信号主要特征。

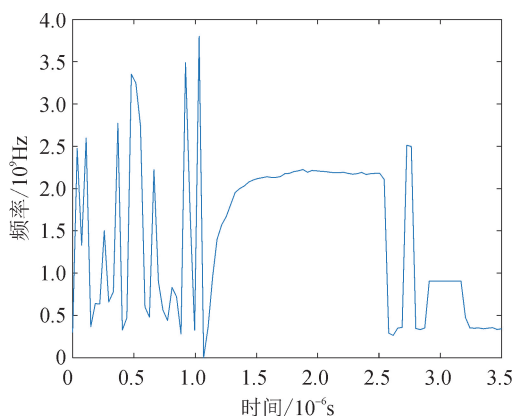


图 12 整合后的最终差频曲线

Fig. 12 Final difference frequency curve after integration

对图 12 中的最终差频曲线进行无效信号去除和曲线平滑后,即可利用式(1)解算得到目标物体的速度。最终得到的小飞片速度曲线见图 13。

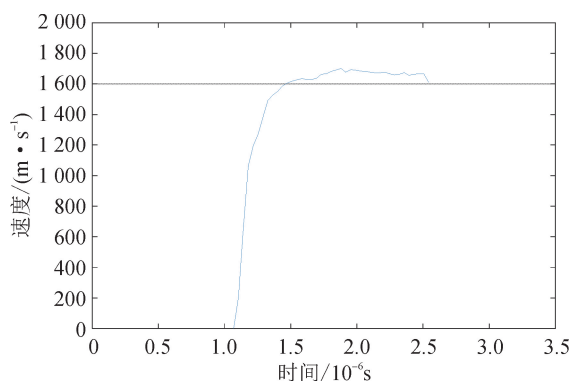


图 13 小飞片速度曲线

Fig. 13 Small flying piece velocity curve

### 3.7 对比分析

对图 3 中的原始多普勒信号分别利用短时傅里叶变换、小波变换和信号联合解调算法进行解算,得到的小飞片速度曲线见图 14。

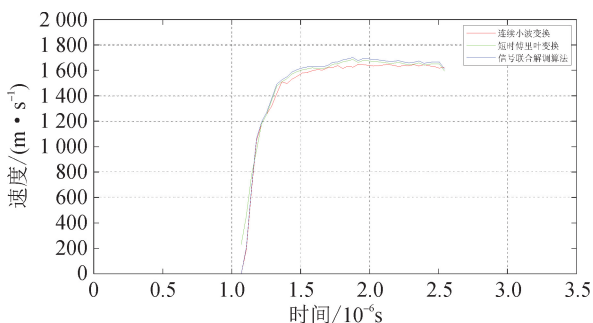


图 14 利用三种算法得到的小飞片速度曲线对比

Fig. 14 Comparison of small flying piece velocity curves obtained by three algorithms

由于目前没有一个严格意义上的小飞片速度标准值可用于对比,而根据大量相关文献可知短时傅里叶变换处理高频信号效果好,小波变换处理低频信号效果好,故本文采取的是在高频下以短时傅里叶变换为基准,分别比较信号联合解调算法和小波变换与平均偏差率;在低频下以小波变换为基准,分别比较信号联合解调算法和短时傅里叶变换与平均偏差率。偏差率是指实际值与期望值的偏差程度,用于衡量实际情况与预期情况的差异。偏差率  $P$  可以表示为:

$$P = \left| \frac{X - Y}{Y} \right| \times 100\% \quad (15)$$

式中:  $X$  为实际值;  $Y$  为预期值。平均偏差率即为求出两条曲线每个对应时刻速度的偏差率后再取所有偏差率的平均值。

在小飞片测速实验领域根据以往经验选取 1.29 GHz 的频率值(对应速度 1 000 m/s)作为高频和低频的分界点。在高频部分通过计算得出,小波变换相比于短时傅里叶变换的平均偏差率为 2.04%。信号联合解调算法相比于短时傅里叶变换的平均偏差率为 0.91%,与小波变换相比平均偏差率降低了 1.13%。可以看出信号联合解调算法对高频信号的处理效果优于小波变换。在低频部分,短时傅里叶变换相比于小波变换缺失了速度从 0 m/s 到 250 m/s 的一段。信号联合解调算法相比于小波变换的平均偏差率为 1.26%,且曲线完整、没有缺失。可以看出信号联合解调算法对低频信号的处理效果优于短时傅里叶变换。

通过以上对比,信号联合解调算法即是对这两种最常用算法的取长补短和优化,规避了两种算法的缺点,最终解算出的速度更符合真实情况,可以作为小飞片速度的真值。小飞片从 0 m/s 开始加速,最开始速度急剧上升,之后由于空气阻力速度逐渐平缓并产生抖动,最高速度可达到 1 715 m/s,最后撞到光纤探头上停止。

本文提出的信号联合解调算法适用于利用 PDV 测速的各种实验场景,例如测量金属桥箔电爆轰下驱动的小飞片速度、爆炸箔爆炸产生的小飞片速度、含能炸药爆轰速度、冲击片雷管与光学窗口的界面粒子速度等。此外原始多普勒信号的频带宽度越大,越能体现出利用信号联合解调算法进行速度解算的优越性。三种算法在单点 PDV 实验下速度解算的运行时间见表 1,可以看出信号联合解调算法运行时间相对较长,但在可接受范围内。此外在多点大阵列式 PDV 实验下需要同时对多个原始多

普勒信号进行批量处理,此时信号联合解调算法相比短时傅里叶变换或小波变换处理速度更慢,耗费的时间更长,为未来的研究提供了方向。

表 1 不同信号解调算法运行时间

Tab. 1 Runtime of different signal demodulation algorithms

| 信号解调算法   | 运行时间/ms |
|----------|---------|
| 短时傅里叶变换  | 388.2   |
| 小波变换     | 717.6   |
| 信号联合解调算法 | 974.5   |

## 4 结 论

针对传统的信号解调算法对频带宽度较大的原始多普勒信号速度解算误差较大的问题,文中提出了一种信号联合解调算法。实验结果表明,信号联合解调算法与短时傅里叶变换相比补全了低频部分的速度,与连续小波变换相比高频部分的速度更精确,从而提高了速度解算的精确度,而且适用于多种测速场景,具有普适性。在算法运行速度上信号联合解调算法稍慢一些,但也在可接受的范围内。此方法为今后的 PDV 在复杂场景下的速度解调提供了新的思路和理论支持。

### 参考文献:

- [1] 吕林杰,武腾飞,韩继博,等. 瞬态高速光子多普勒测速技术研究现状及展望[J]. 计测技术, 2021,41(2): 64-72.  
Lü Linjie, Wu Tengfei, Han Jibo, et al. Research status and prospect of transient high speed photon Doppler velocimetry[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021,41(2):64-72.
- [2] 李建中,王德田,刘俊,等. 多点光子多普勒测速仪及其在爆轰物理领域的应用[J]. 红外与激光工程,2016,45(4):216-221.  
Li Jianzhong, Wang Detian, Liu Jun, et al. Multi-channel photonic Doppler velocimetry and its application in the field of explosion physics[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016,45(4):216-221.
- [3] Nie Xiaoming, Zhou Jian. Pitch independent vehicle-based laser Doppler velocimeter [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 131: 106072.
- [4] Pei Hongbo, Huang Wenbin, Zhang Xu, et al. Measuring detonation wave profiles in plastic-bonded explosives using PDV[J]. AIP Advances, 2019,9: 015306.
- [5] Mance J G, La Lone B M, Dolan D H, et al. Time-stretched photonic Doppler velocimetry[J]. Optics Express, 2019, 27(18): 25022-25030.
- [6] Chu Pinghan, Kilic V, Foster M A, et al. Time-lens photon Doppler velocimetry (TL-PDV)[J]. Physical Optics, 2021, 6(1).
- [7] 蒲梦瑶,胡以华,曲芳慧,等. 变速目标的光子回波外差信号处理方法研究[J]. 中国激光, 2023, 50(10): 222-232.  
Pu Mengyao, Hu Yihua, Qu Fanghui, et al. Signal processing method of photon echoes heterodyne for variable-speed target[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(10):222-232.
- [8] 刘鲁缘,陈家绪,刘琳,等. 基于聚类-短时傅里叶变换的微弱振动信号时频分析方法[C]//中国自动化学会. 2022 中国自动化大会论文集. 南京邮电大学 物联网学院,2022:5.  
Liu Luyuan, Chen Jiaxu, Liu Lin, et al. Time-frequency analysis of weak vibration signals based on clustering-short-time Fourier transforms[C]//Chinese Society of Automation. Proceedings of Automation China 2022. School of Internet, Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022:5.
- [9] 吴同,苏莉娜,田佳俊,等. 基于两阶段 STFT 的微弱信号时频分析方法[C]//中国自动化学会. 2023 中国自动化大会论文集. 南京邮电大学物联网学院,2023:6.  
Wu Tong, Su Lina, Tian Jiajun, et al. A two-stage S-TFT-based time-frequency analysis of weak signals [C]//Chinese Society of Automation. Proceedings of Automation China 2023. School of Internet, Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023:6.
- [10] 戴景钊,张大治,段小艳. 光子多普勒测速系统信号解调方法比较[J]. 计测技术,2019,39(5):1-7.  
Dai Jingzhao, Zhang Dazhi, Duan Xiaoyan. Comparison of signal demodulation methods for photon Doppler velocimetry system [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(5):1-7.
- [11] 孙艺圃,王健,吴重庆. 采样频率和滤波方法对光子多普勒测速误差的影响[J]. 激光杂志, 2021, 42(8): 9-14.  
Sun Yipu, Wang Jian, Wu Chongqing. Influence of sampling frequency and filtering method on the error of photon Doppler velocimetry[J]. Laser Journal, 2021, 42(8):9-14.
- [12] 梅迪,何军强,李党娟,等. Livewire 算法的微弱多普勒信号速度解调方法[J]. 西安工业大学学报, 2023, 43(2):140-147.  
Mei Di, He Junqiang, Li Dangjuan, et al. Velocity demodulation method for weak Doppler signals based on livewire algorithm[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2023, 43(2):140-147.
- [13] Chen Zhen, Rettinger R, Hefferman G, et al. Micro-wave-modulated photon Doppler velocimetry[J]. IEEE

- Photonics Technology Letters, 2016, 28(3):327-333.
- [14] 朱振,胡艳,吴立志,等. 基于 PDV 技术的微型雷管爆炸驱动飞片速度测试研究[J]. 爆破器材,2016,45(5):56-61.
- Zhu Zhen, Hu Yan, Wu Lizhi, et al. Investigation on flyer velocity driven by miniature detonators based on the PDV technology[J]. Explosive Materials, 2016, 45(5): 56-61.
- [15] Hutchinson T M, Awe T J, Bauer B S, et al. Photonic Dopplervelocimetry of ohmically exploded aluminum surfaces[J]. Physics of Plasmas, 2020, 27: 052705.
- [16] Nissim N, Greenberg E, Werdiger M, et al. Free-surface velocity measurements of opaque materials in laser-driven shock-wave experiments using photonic Doppler velocimetry[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2021, 6: 046902.
- [17] 陆苗霞. 小波变换在信号去噪方面的仿真研究[J]. 科技创新与应用,2022,12(5):48-50.
- Lu Miaoxia. Simulation study of wavelet transform for signal denoising[J]. Technological Innovation and Application, 2022, 12(5):48-50.
- [18] 梅迪,王可暄,杜昱岐,等. 一种自适应光子多普勒信号解调方法[J]. 自动化与仪器仪表,2023(3):13-17,25.
- Mei Di, Wang Kexuan, Du Yuqi, et al. An adaptive photon Doppler signal demodulation method[J]. Automation & Instrumentation, 2023(3):13-17, 25.
- [19] Siddique M F, Ahmad Z, Ullah N, et al. A hybrid deep learning approach: integrating short-time Fourier transform and continuous wavelet transform for improved pipeline leak detection[J]. Sensors, 2023, 23(19):8079.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 175 页)

- [18] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, et al. The human footprint and the last of the wild:the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not[J]. BioScience, 2002, 52(10): 891-904.
- [19] 金铭,李明玉,李美娟,等. 长吉图地区“生产—生活—生态”空间生境质量时空演变分析[J]. 延边大学农学报,2022,44(2):99-109.
- Jin Ming, Li Mingyu, Li Meijuan, et al. Analysis on spatial and spatial evolution of habitat quality in production-life-ecology space in Changchun-Jilin-Tumen region[J]. Agricultural Science Journal of Yanbian University, 2022, 44(2): 99-109.
- [20] 段群滔,罗立辉. 1990—2015 年青藏高原人类足迹数据集[J/OL]. 中国科学数据,2020,5(3). (2020-01-30). DOI: 10.11922/csdata.2019.0082.zh.
- Duan Quntao, Luo Lihui. A dataset of human footprint over the Qinghai-Tibet Plateau during 1990—2015[J/OL]. CHINA Scientific Data, 2020, 5(3). (2020-01-30). DOI: 10.11922/csdata.2019.0082.zh.
- [21] 黄卓男. 广东省人类足迹与生态系统服务功能时空响应关系研究[D]. 广东:广州大学,2023.
- Huang Zhuonan. Analysis of spatiotemporal relationship of human activity with and its influence on ecosystem service functions in Guangdong Province [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.
- [22] He Jingfeng, Yao Yake, Huang Ge, et al. Intensification of the density stability in the air dense medium gas-solid fluidized bed based on a binary dense media [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2017, 122: 58-67.
- [23] Mengist W, Soromessa T. Assessment of forest ecosystem service research trends and methodological approaches at global level: a meta-analysis[J]. Environmental Systems Research. 2019, 8(1): 22.
- [24] 成超男,胡杨,冯尧,等. 基于 CA-Markov 模型的城市生态分区构建研究——以晋中主城区为例[J]. 生态学报,2020,40(4):1455-1462.
- Cheng Chaonan, Hu Yang, Feng Yao, et al. Construction of urban ecological zones based on CA-Markov model: a case study of the main urban area of Jinzhong [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1455-1462.

(责任编辑 王绪迪)