

## 激光多普勒振动信号的时频分析

陈鸿凯 王挺峰 吴世松 李远洋 郭劲 吴皓

### Time-frequency analysis of laser doppler radar vibration signals

CHEN Hong-kai, WANG Ting-feng, WU Shi-song, LI Yuan-yang, GUO Jin, WU Hao

引用本文:

陈鸿凯, 王挺峰, 吴世松, 李远洋, 郭劲, 吴皓. 激光多普勒振动信号的时频分析[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 1014–1022. doi: 10.37188/CO.2019–0251

CHEN Hong-kai, WANG Ting-feng, WU Shi-song, LI Yuan-yang, GUO Jin, WU Hao. Time-frequency analysis of laser doppler radar vibration signals[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1014–1022. doi: 10.37188/CO.2019-0251

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019–0251>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于激光多普勒频移的钢轨缺陷监测

Rail defect monitoring based on laser Doppler frequency shift theory

中国光学. 2018, 11(6): 991 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0991>

#### 高重频CO<sub>2</sub>激光干扰技术研究

Research on the interference technology of high repetition frequency CO<sub>2</sub> laser

中国光学. 2018, 11(6): 983 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0983>

#### 瓦级319nm单频连续紫外激光的实现及铯原子单光子Rydberg激发

Realization of a watt-level 319-nm single-frequency CW ultraviolet laser and its application in single-photon Rydberg excitation of cesium atoms

中国光学. 2019, 12(4): 701 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0701>

#### 无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析

Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar

中国光学. 2018, 11(5): 711 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0711>

#### Na<sub>5</sub>[B<sub>2</sub>P<sub>3</sub>O<sub>13</sub>]晶体的紫外-远红外光谱分析

Analysis of ultraviolet-far-infrared spectra of Na<sub>5</sub>[B<sub>2</sub>P<sub>3</sub>O<sub>13</sub>] crystal

中国光学. 2019, 12(5): 1118 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1118>

#### 锂离子动力电池极片的激光切割分析

Analysis of laser cutting of lithium-ion power battery pole piece

中国光学. 2018, 11(6): 974 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0974>

文章编号 2095-1531(2020)05-1014-09

## 激光多普勒振动信号的时频分析

陈鸿凯<sup>1,2</sup>, 王挺峰<sup>1\*</sup>, 吴世松<sup>1,2</sup>, 李远洋<sup>1</sup>, 郭 劲<sup>1</sup>, 吴 皓<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质  
相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 96901 部队, 北京 100094)

**摘要:** 激光多普勒雷达实际测得的振动信号绝大多数都是时变信号, 而基于傅立叶变换的时频分析方法是处理时变信号的有利工具。本文针对激光多普勒雷达测得的实际振动信号, 比较了魏格纳-维利分布、平滑伪魏格纳-维利分布、频谱图、波恩-约旦分布和扩展修正 B 分布 5 种形式的时频分析性能。利用激光多普勒雷达测量实际单音响产生的啁啾信号振动、双音响产生的二分量啁啾信号振动、以及成年男性心跳振动 3 种振动, 分析了时频图的分辨率和交叉项抑制情况, 并通过计算时频聚集度指数, 比较了 5 种分布情况下振动的分析性能。实验证明, 扩展修正 B 分布的性能优于其他 4 种时频分布, 扩展修正 B 分布更适合应用于激光多普勒雷达材料共振频率探测和心跳检测领域。

**关键词:** 时频分析; 激光多普勒测量; 扩展修正 B 分布

中图分类号: TN958.95

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2019-0251

## Time-frequency analysis of laser doppler radar vibration signals

CHEN Hong-kai<sup>1,2</sup>, WANG Ting-feng<sup>1\*</sup>, WU Shi-song<sup>1,2</sup>, LI Yuan-yang<sup>1</sup>, GUO Jin<sup>1</sup>, WU Hao<sup>3</sup>

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *PLA 96901 Unit No. 109, Beijing 100094, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: wangtingfeng@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** Most actual vibration signals measured by lidar are time-varying signals. Methods of time-frequency analysis based on Fourier transforms are effective tools for processing time-varying signals. In this paper, the properties of the Wigner-Wiley distribution, the smooth pseudo-Wigner-Wiley distribution, the spectrogram, the Bonn-Jordan distribution, and the extended modified B distribution are compared and analyzed with actual vibration signals measured by laser Doppler radar. Three kinds of vibrations are measured with a laser Doppler radar: chirps generated by a single loudspeaker, two-component chirps generated by two loudspeakers, and adult male heartbeat vibrations. Their time-frequency distribution resolution and the sup-

收稿日期: 2019-12-31; 修订日期: 2020-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61805234)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61805234)

pression of cross-terms are analyzed. By calculating the time-frequency concentration index, the analysis capacities of the five distributions for three vibrations are compared. Experimental results indicate that the performance of the extended modified B distribution is better than that of the other four time-frequency distributions. Therefore, the extended modified B distribution is more suitable for the detection of material resonance frequency of laser Doppler radar and the detection of heartbeat.

**Key words:** time-frequency analysis; laser doppler measurement; extended modified B distribution

## 1 引言

振动不仅与自然界的运行规律息息相关,在工程应用中,也扮演着重要的角色。振动测量可以分为接触测量和非接触测量两大类:接触测量主要通过目标表面上或在目标内部放入压电传感器或应力计等设备进行测量,这类测量方法可能会对测量目标造成损伤且不适合用于复杂环境,存在着较大的局限性;而非接触测量则主要利用激光雷达等遥感设备,通过直接测量振动幅值或间接测量振动所引起的多普勒频移,其可以实现对目标振动的高精度无损伤测量,因此被广泛地应用于工程领域。

激光多普勒雷达<sup>[1-3]</sup>是非接触振动测量的一个重要手段。当激光多普勒雷达发射的光波被目标振动调制后,雷达接收机获得的经过目标调制的光波信号相对于发射光会附带一个额外的频移,这个频移与目标运动速度大小有关,这就是人们熟知的多普勒效应。通常,激光多普勒雷达测量得到的真实振动信号都是频率随时间变化的时变非平稳信号,采用傅立叶分析无法了解幅频随时间变化的情况。针对这一情况,学者们通常通过分析激光多普勒雷达测得的振动信号的二维时频分布,来分析振动目标的特征。

信号的时频分布一直是信号处理领域的研究热点,自从上个世纪中期开始,国内外研究者针对信号时频分布就进行了大量的研究,并提出了多种分布算法。Gabor<sup>[4]</sup>和 Luis<sup>[5]</sup>分别提出了短时傅立叶变换和分数傅立叶变换来提升傅立叶变换的实际分析问题能力。Cohen<sup>[6]</sup>总结了基于信号能量的二次型时频分析方法。近年来,基于信号自适应的 B 分布<sup>[7]</sup>被提出,极大地提升了时频分

布的分辨率,Boashash 针对 B 分布的不足之处又提出了 B 分布的改进版本<sup>[8]</sup>。时频分析算法被广泛地应用于目标识别<sup>[9-10]</sup>、建筑结构安全评估<sup>[11-12]</sup>、地震波分析<sup>[13]</sup>、生物医学信号处理<sup>[14-16]</sup>等领域。在激光多普勒雷达测量领域,时频分析同样也有大量的应用:王云鹏<sup>[17-18]</sup>利用平滑伪魏格纳-维利分布来分析飞行器旋翼运动特征;吕韬<sup>[19]</sup>利用谱图来分析激光多普勒雷达所获得的语音信号的质量;Emil<sup>[20]</sup>利用啁啾信号激励冰块,通过观察冰块的时频响应测量冰块的固有频率以及其共振特性。

时频分析方法种类繁多,应用领域广泛,选择合适的时频分布算法,提升激光多普勒雷达测量振动信号的时频分辨率,是提升激光多普勒雷达测量性能的一个重要手段。本文利用魏格纳-维利分布、平滑伪魏格纳-维利分布、频谱图、波恩-约旦分布和扩展修正 B 分布这 5 种常见的二次型时频分布对激光多普勒雷达采集到的实际振动信号进行时频分析。通过分析时频图的分辨率和对交叉项的抑制程度以及时频聚集度评价指数对 5 种时频分布的实际性能做出比较,从而选择出合适的分布形式。

## 2 激光多普勒雷达工作原理

### 2.1 探测信号模型

考虑一个收发合置的激光多普勒雷达系统。若发射激光的本地光频率为  $f_c$ ,则发射光信号可以写为:  $E_t(t) = E_0 \exp(j2\pi f_c t)$ ,其中  $E_0$  表示激光光束的复振幅。设在初始时刻 ( $t_0 = 0$ ),与激光多普勒雷达探测系统相距  $R_0$  的地方存在一个待测点目标  $P$ ,如图 1 所示,该目标以  $v(t)$  的速度沿着与雷达视线方向呈夹角  $\theta$  的方向运动。

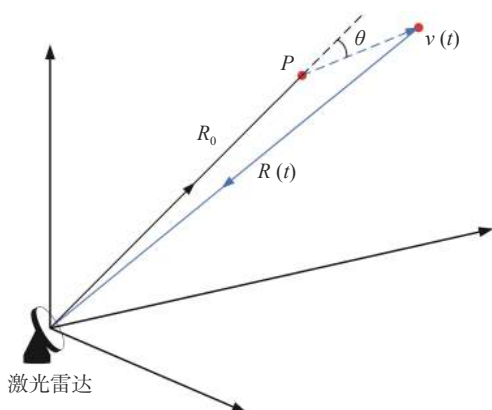


图 1 激光雷达探测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser lidar detection

则在  $t$  时刻, 该目标与激光雷达距离  $R$  与时间  $t$  的关系可以表示为:

$$R(t) = \int_0^t v(u) \cos \theta du + R_0, \quad (1)$$

其中  $u$  为时间轴。由目标散射返回的回波信号光被雷达接收机接收时, 经过的光程为  $2R(t)$ , 因此, 回波信号光可以表示为:

$$E_r(t) = \rho E_0 \exp \left[ j2\pi f_c \left( t - \frac{2R(t)}{c} \right) \right], \quad (2)$$

其中,  $\rho$  是目标的散射系数,  $c$  是电磁波在自由空间中传播的速度。令目标运动所导致的激光光束相位变化为:

$$\phi(t) = 2R(t) f_c / c. \quad (3)$$

从式(3)可以推出回波散射光中包含的表示物体运动的多普勒频移为:

$$f_d = \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{2v(t) \cos \theta}{\lambda_c}, \quad (4)$$

其中  $\lambda_c = c/f_c$ , 是激光器的工作波长。

## 2.2 相干激光多普勒雷达工作原理

常用的激光频率远远高于光电探测器的响应带宽, 因此通常采用相干探测手段间接测量目标回波散射光中的多普勒频移<sup>[21-23]</sup>。

基于全光纤光路的相干激光多普勒雷达原理图如图 2 所示。该系统的工作原理为: 激光器所发射的激光光束经过光纤分束器, 被分为本地光和发射信号光, 发射信号光经过中频频率为  $f_A$  的声光调制器 (AOM) 调制以后, 从环形器的端口

1 进入, 从端口 2 出射, 经过望远镜组照射到目标表面。经过目标运动调制的回波散射光被同一望远镜接收后, 从环形器的端口 2 入射, 端口 3 出射。

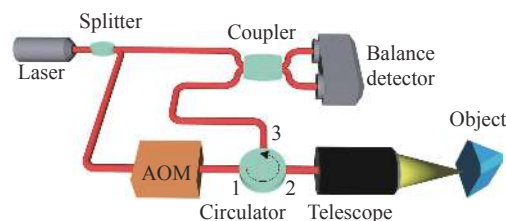


图 2 全光纤相干激光多普勒雷达原理图

Fig. 2 Block diagram of all fiber coherent laser Doppler radar

信号光经过声光调制器调制后, 公式(2)中的回波信号光可改写为:

$$E_r(t) = \rho E_0 \exp \left[ j2\pi \left( f_c + f_A - \frac{2R(t)}{c} f_c \right) t \right]. \quad (5)$$

回波散射光在光纤合束器中与本地光相干混频, 若回波光和本地光光强分别为  $i_r$  和  $i_l$ , 则光电探测器上输出的光电流为:

$$i(t) = i_r + i_l + 2\sqrt{i_r i_l} \cos [2\pi f_A t - \phi(t)]. \quad (6)$$

## 3 微振动信号的时频分析方法

### 3.1 时频分析方法的分类

由于标准傅立叶变换求出的频域函数对应着整个时间轴, 而无法表达出频域中频率分量与时域对应关系。而时频分析则可以将信号的时域信息和频域信息关联起来, 用于解释局部信号的频谱分布情况和说明信号频率随时间变化的规律。

时频分析方法可以分为以下两类: 线性时频分析和二次型时频分析。其中, 线性时频分析是由于傅立叶分析对实际信号的分析能力较弱而被提出的, 最具有代表性的是短时傅立叶变换 (Short Time Frequency Transform, STFT)。二次型时频分析则主要是从信号能量的角度对信号进行分析, 二次型时频分析又称为双线性时频分析或者 Cohen 类时频分析, 这类变换通过选择不同的参数及函数, 就能衍生出各种不同的二次型时频变换。



### 3.2 短时傅立叶变换 (STFT)

STFT 的基本思想是将时变信号  $x(t)$  分割成多段广义短时稳定的子信号, 利用时间长度为  $R$  的窗函数  $w(t)$  进行截取, 再对截取的子信号片段进行傅立叶变换, 进而分析该时间间隔内存在的频率分量, 从而得到该时间间隔内的傅立叶谱为:

$$STFT_x(\omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)w(\tau-t)e^{-j2\pi\omega\tau} d\tau. \quad (7)$$

对信号进行一次 STFT 时, 其窗函数通常都是固定的, 因此, STFT 的分辨率受海森堡不确定性原理限制, 即需要满足以下条件:  $\Delta t \times \Delta f \geq 1/4\pi$ 。窗函数固定可以确定时频分辨率, 但同时也限制了短时傅立叶变换的自适应能力与鲁棒性。

### 3.3 二次型时频分布

Cohen 提出二次型时频分布可以统一表示成信号  $x(t)$  的模糊函数的加权二维傅立叶变换的形式, 记为:

$$C_x(\omega, t) = \iint A(\theta, \tau)g(\theta, \tau)e^{-j2\pi(\theta t + \omega\tau)} d\theta d\tau, \quad (8)$$

其中,  $g(\theta, \tau)$  称为参函数或者权重,  $A(\theta, \tau)$  是信号  $x(t)$  的模糊函数, 表示为:

$$A(\theta, \tau) = \int x\left(t + \frac{\tau}{2}\right)x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)e^{j2\pi\theta t} dt. \quad (9)$$

给定不同的参函数就可以得到不同的二次型时频分布。

#### 3.3.1 魏格纳-维利分布 (WVD)

在所有二次型时频分布中, WVD 通常被认为是基本的或原始的二次时频分布, 其参函数  $g(\theta, \tau) \equiv 1$ 。对于时变信号  $x(t)$ , 假设其经过希尔伯特变换后得到的解析信号为  $z(t)$ , 则信号  $x(t)$  的 WVD 表达式可表示为:

$$WVD_x(\omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} z\left(t + \frac{\tau}{2}\right)z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)e^{-j2\pi\omega\tau} d\tau. \quad (10)$$

式(10)被称为信号项或者关于  $x(t)$  自魏格纳-维利分布。虽然 WVD 具有理论最优的时频分辨率, 且可为啁啾信号提供最优的时频聚集度, 但若存在多分量信号时, WVD 分布会在除信号项以外的地方出现分布串扰。这种串扰称为交叉项 (cross-terms), 是由多分量信号之间互相关运算产

生的, 交叉项的存在会影响对信号的分析结果以及对信号特征的识别。

#### 3.3.2 平滑伪魏格纳-维利分布 (SPWVD)

考虑到互相关所产生的交叉项在信号模糊平面上的分布位于远离原点的高频区域, 而自相关信号项则会聚集在模糊平面上的原点附近。降低交叉项的一种办法是给时域或频域添加平滑函数  $h(\tau)$  或  $G(\omega)$ 。一种常用的有效抑制交叉项的方法是同时在时域和频域上进行平滑滤波, 得到平滑伪魏格纳-维利分布 (Smooth Pseudo Wigner-Ville Distribution, SPWVD), 表示为:

$$SPWV_x(\omega, t) = \iint g(u)h(\tau)z\left(t - u + \frac{\tau}{2}\right)z^*\left(t - u - \frac{\tau}{2}\right)e^{-j2\pi\omega\tau} du d\tau. \quad (11)$$

SPWVD 抑制交叉项能力强且容易实现, 但由于双平滑窗口的存在使得信号项在时域和频域上都发生了延展, 从而降低了时频聚集性。

#### 3.3.3 波恩-约旦分布 (BJD)

另一种有效抑制交叉项的办法是设计不同的参函数  $g$ 。参函数  $g$  需要满足模糊函数域上的低通滤波特性<sup>[5]</sup>。其中, BJD 具有很强的时频分辨率保持能力, 其可表示为:

$$g(\theta, \tau) = \frac{\sin(\pi\theta\tau)}{\pi\theta\tau}. \quad (12)$$

从 BJD 的参函数中容易得出  $\lim_{\theta \rightarrow 0} g(\theta, \tau) = 1$ ,  $\lim_{\tau \rightarrow 0} g(\theta, \tau) = 1$ 。这就意味着 BJD 可以完全保留位于原点的信号项能量, 但无法抑制分布在模糊平面横轴和纵轴上的交叉项。

#### 3.3.4 频谱图 (SPEC)

频谱图 (Spectrogram, SPEC) 与短时傅立叶谱密切相关, 其通常采用公式(13)计算 STFT 的模值平方得到:

$$SPEC_x = |STFT_x(\omega, t)|^2. \quad (13)$$

因此, 它同样面临着时间分辨率与频谱分辨率之间相互制约的问题。

#### 3.3.5 扩展修正 B 分布 (EMBD)

扩展修正 B 分布 (Extended Modified B-Distribution, EMBD) 是基于 B 分布发展而来的, B 分布是一种基于信号项的自适应二次型时频分布。B 分布的参函数可以表示为一个高通滤波权重

$h(\tau)$ 和一个低通滤波权重 $K(\theta)$ 的乘积:

$$g(\theta, \tau) = h(\tau) \times K(\theta) = |\tau|^\beta \times \frac{|\Gamma(\beta + j\pi\theta)|^2}{2^{1-2\beta}\Gamma(2\beta)}, \quad (14)$$

其中,  $-0.5 \leq \tau \leq 0.5$ ,  $-0.5 \leq \theta \leq 0.5$ ,  $0 \leq \beta \leq 1$ , 由此来保证输出的参函数具有低通特性。由于 B 分布的参函数中出现了高通滤波权重, 因此, 对于位于模糊域原点附近的信号项来说, 为了保持全通特性, 需要取  $\beta \ll 1$ , 其带来的结果是仅能保持缓变的信号时频聚集度, 同时 B 分布会完全滤去位于原点的信号项。为了弥补 B 分布这一缺点, EMBD 用两个低通权重代替 B 分布的高通权重和低通权重, 表示为:

$$g(\theta, \tau) = \frac{|\Gamma(\beta + j\pi\theta)|^2}{\Gamma^2(\beta)} \frac{|\Gamma(\alpha + j\pi\tau)|^2}{\Gamma^2(\alpha)}, \quad (15)$$

其中,  $-0.5 \leq \tau \leq 0.5$ ,  $-0.5 \leq \theta \leq 0.5$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ ,  $0 \leq \beta \leq 1$ 。

### 3.4 时频聚集度评价标准

除了通过观察时频分布图上信号能量的聚集程度以及是否存在交叉项来评价时频分析算法的性能以外, 还可以采用文献 [24] 中给出的时频聚集度评价标准来定量分析时频分析算法的优劣。时频聚集度评价指标可以通过计算时频分布的第四幂范数和第二幂范数之商来获得, 记为:

$$E_p = \frac{\iint |C_x(\omega, t)|^4 d\omega dt}{\left(\iint |C_x(\omega, t)|^2 d\omega dt\right)^2}, \quad (16)$$

其中,  $C_x(\omega, t)$ 表示任意一种二次时频分布。时频聚集度评价越高, 则说明信号在该时频分布中, 信号项能量越集中, 交叉项干扰越小。

## 4 测量实验与结果

### 4.1 实验装置

本文所采用的非接触式双声光调制相干激光多普勒雷达系统是由一个含有光纤尾纤的窄带激光器、一个  $1 \times 2$  的光纤分束耦合器(分束比为 10:90)、一个  $2 \times 2$  的 3 dB 光纤耦合器、中频分别为 40 MHz 和 60 MHz 的声光调制器、发射望远镜、接收望远镜以及光电平衡探测器组成, 系统的原

理图以及实物图分别如图 3 和图 4 所示。

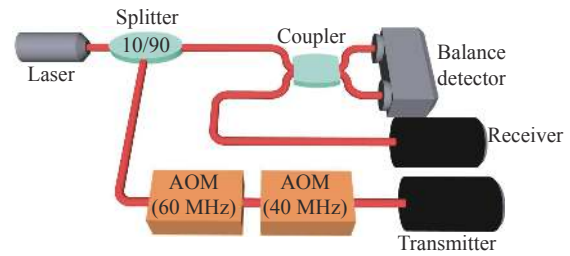


图 3 双声光调制相干激光多普勒雷达原理图

Fig. 3 Block diagram of coherent laser Doppler radar with double acoustic optic modulation

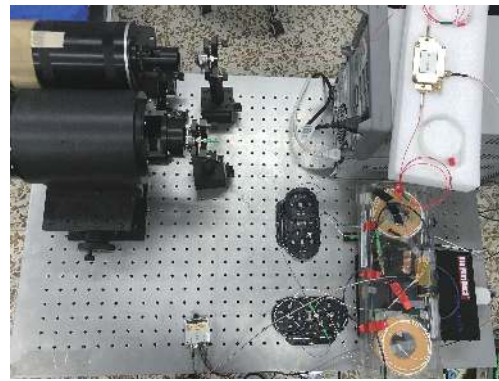


图 4 双声光调制相干激光多普勒雷达实验装置图

Fig. 4 Experimental device of coherent laser Doppler radar with double acoustic optic modulation

由于两个望远镜紧挨着并排放置, 因此这种收发分置的激光多普勒探测系统可以近似看成是收发合置的激光多普勒雷达系统, 并可以采用公式(5)近似。这种配置能避免收发合置全光纤激光多普勒探测系统因位于环形器和望远镜耦合端的光纤尾纤反射光与本地光混频而产生中频串扰信号。激光器的发射波长为 1550 nm, 线宽为 2.4 kHz, 输出功率为 22 mW, 其发射的是窄带连续激光。发射信号光经过 60 MHz 和 40 MHz 两个声光调制器调制, 采用这种双声光调制器的配置可以将外差探测的中频移至两个声光调制器的和频(100 MHz)和差频(20 MHz)上, 这样可以避免声光调制器射频驱动辐射产生中频串扰噪声, 从而提高回波信号的信噪比。

本文所测得的实验数据是来自于距激光多普勒雷达 20 m 处的音响所产生的实际微振动以及成年男性的心跳微振动信号。利用 WVD、SP-

WVD、SPEC、BJD、EMBD 5 种时频分析方法对激光多普勒雷达所探测到的实际微振动信号的振动频率进行时频分析。

#### 4.2 单分量啁啾信号振动时频分析

利用计算机生成振幅保持不变的归一化啁啾信号, 并将其振动音频输入给音响。利用 4.1 中的激光多普勒雷达系统获取振动信号。获取到的实际振动信号以及 5 种时频分布图如图 5 所示, 时域振幅以及频率均进行了归一化, 其中 SPEC 和 SPWVD 均采用窗长度为 127 的汉明窗, EMBD 的参数为  $\alpha=0.01, \beta=0.5$ 。

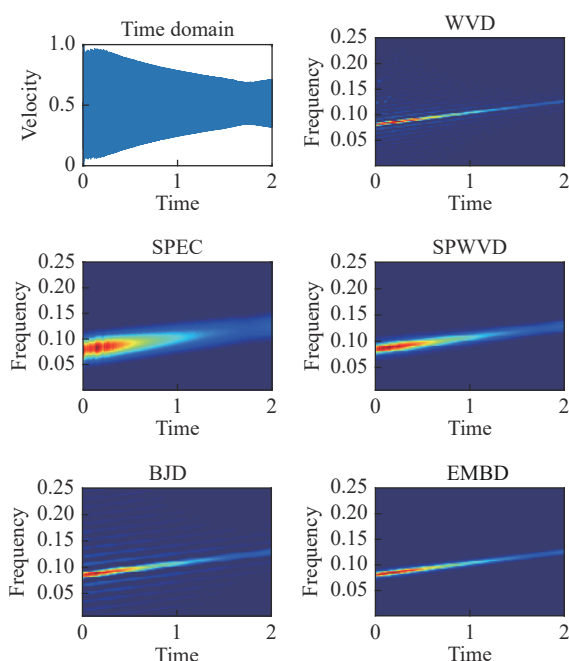


图 5 单分量啁啾信号的振动时域图及其时频分布

Fig. 5 Time domain and time frequency distribution of single component chirps

从图 5 中的 WVD 的结果可以看出, 实际测量得到的单分量啁啾信号会与测量噪声产生互相关从而产生交叉项, 严重影响了时频图的性能。该测量噪声所引起的交叉项的特点是频率变化趋势与信号项相同且在与信号项平行的方向上呈周期性分布。SPEC 和 SPWVD 能极大程度地抑制交叉项的存在并减少噪声干扰, 但这两种时频分布在频谱方向上发生了延展, 导致信号分辨率较低, 时频聚集度较差, 其中 SPEC 的延展程度比 SPWVD 更大。从 BJD 和 EMBD 的时频图可以

看出, 这两种时频分布可以达到与 WVD 较为接近的分辨率。但与 EMBD 相比, BJD 对交叉项的抑制能力稍弱, 而从 EMBD 时频图又可以清楚地看出, EMBD 时频分析算法可以在保证信号时频聚集度的前提下, 最大程度地抑制交叉项干扰。通过时频聚集度评价公式得到的评价指数如表 1 所示。由表 1 可知, WVD, BJD 和 EMBD 的数量级相同, 且 EMBD 和 BJD 的数值接近于 WVD 且远高于 SPEC 和 SPWVD。这说明 WVD, BJD 和 EMBD 的时频聚集度高于 SPEC 和 SPWVD, 该结论与从图 5 观察得到的结果相同。值得注意的是, 虽然 WVD 在理论上对啁啾信号具有最优的时频聚集度, 但在实际应用中, 由于 WVD 对噪声没有抑制能力, 导致其时频聚集能力稍弱于 BJD 和 EMBD。除此之外, 从时频图中还可以看出, 音响对不同频率振动的响应特性, 当振动频率升高时, 音响响应幅值降低, 这与音响共振频率曲线有关。

表 1 单分量啁啾信号的振动时频聚集度评价

Tab. 1 Evaluation of time frequency concentration of single component chirps vibration

时频分布	WVD	SPWVD	SPEC	BJD	EMBD
评价指数	$1.89 \times 10^{-4}$	$5.05 \times 10^{-5}$	$2.88 \times 10^{-5}$	$1.97 \times 10^{-4}$	$2.12 \times 10^{-4}$

#### 4.3 二分量的啁啾信号振动时频分析

利用计算机生成归一化振幅保持不变的两个啁啾信号振动音频, 将同时输入给两个音响, 获取到的实际振动信号以及 5 种时频分布图如图 6 所示。各种分布的参数设置同 4.2 节。

从图 6 中 WVD 的结果可以看出, 由于两个啁啾信号互相关, 在交点位置出现了沿水平轴的交叉项干扰, 除此之外, 噪声与两个啁啾信号之间的互相关串扰对 WVD 时频图产生了严重污染。然而, 其他 4 种二次型时频分布均能很好地抑制多分量信号之间存在的交叉项。但 SPEC 和 SPWVD 仍然发生了频谱展宽, 损失了时频聚集度, BJD 对于信号与噪声之间的交叉项抑制效果不佳, 两个啁啾信号之间仍然存在大量的交叉项干扰, 而 EMBD 与其他时频分布相比, 保持着较高的鲁棒性。通过时频聚集度评价公式得到的评价

指数如表 2 所示。从时频聚集度评价指标来看, SPEC 分布的评价值最低, 对应到时频图中表现为频率展宽最严重。虽然从时频图可以观察到, 对于二分量啁啾振动, WVD 和 BJD 的频谱展宽较小, 分辨率较高, 但由于交叉项没有得到很好的抑制, 故两种分布下的时频聚集评价指数较低。综上所述, EMBD 相比于其他 4 种时频分析方法, 对于双振动源信号叠加的分析更有优势。

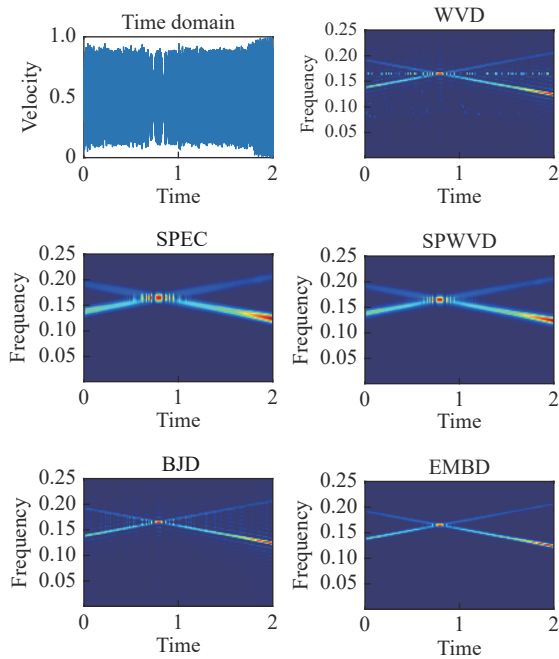


图 6 二分量啁啾信号振动时域图及其时频分布  
Fig. 6 Time domain and time frequency distribution of two component chirps vibration

表 2 二分量啁啾信号振动时频聚集度评价

Tab. 2 Evaluation of time frequency concentration of two component chirp vibration

时频分布	WVD	SPWVD	SPEC	BJD	EMBD
评价指数	$8.88 \times 10^{-5}$	$7.12 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-5}$	$9.16 \times 10^{-5}$	$1.08 \times 10^{-4}$

#### 4.4 心跳振动时频分析

图 7 是利用 4.1 中的激光多普勒雷达系统获取的成年男性心跳微振动信号时域图, 其中每个心跳周期内的主波峰被称为 QRS 波, 出现的第二个波峰称为 T 波。心跳信号的时频分布图如图 8 所示。通过时频聚集度评价公式得到的评价指数如表 3 所示。

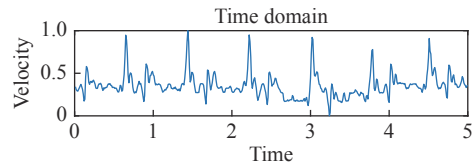


图 7 成年男性心跳振动时域图

Fig. 7 Time domain diagram of adult male heartbeat vibration

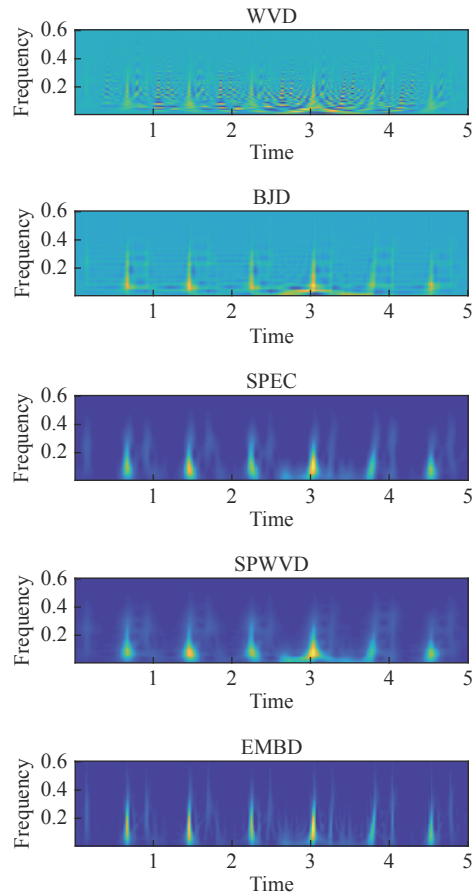


图 8 成年男性心跳振动时频分布

Fig. 8 Time frequency distribution of adult male heartbeat vibration

表 3 成年男性心跳振动时频聚集度评价

Tab. 3 Evaluation of time frequency concentration of adult male heartbeat vibration

时频分布	WVD	SPWVD	SPEC	BJD	EMBD
评价指数	$2.67 \times 10^{-4}$	$3.07 \times 10^{-4}$	$4.00 \times 10^{-4}$	$4.94 \times 10^{-4}$	$5.56 \times 10^{-4}$

从图 8 对心跳振动的 WVD 分析结果可知, 心跳振动时频分布主要存在的交叉项干扰是沿着竖直频率轴方向的心跳振动单个周期内的主波峰



(QRS波)以及次波峰(T波)之间互相关引起的串扰以及不同周期振动峰的互相关所产生的串扰,且次波峰由于能量不高,而被埋在交叉项干扰中,其时频聚集度评价指数最低。SPEC分布和SPWVD分布都消除了交叉项干扰,并能在二者时频图中看到心跳信号的QRS波和T波两个峰值,但都发生了频谱展宽。BJD分布抑制了振动峰之间的交叉项干扰,且时频聚集度评价指数仅次于EMBD,但次波峰仍然埋在噪声中,信号的分辨率较低。EMBD不仅能清楚地看出QRS波和T波在时频图上的分布位置,同时还保证了时频分辨率,极大地抑制了交叉项带来的干扰,有利于后续对人体心脏健康情况的分析与判别。

## 5 结论

本文分析了WVD、SPWVD、SPEC、BJD以及EMBD 5种时频分布在激光多普勒雷达微振

动信号实际测量中的性能。通过测量得到的实际啁啾信号、二分量啁啾信号以及男性心跳振动信号,观察时频图中信号能量的分辨率以及交叉项的抑制情况,并利用时频聚集度评价公式对5种时频分布的性能做出了比较。从时频图的比较结果以及时频聚集度评价指数可以得出:WVD分布由于存在交叉项干扰,在实际应用中无法准确分辨出信号项;BJD由于其自身参函数的限制,虽然能保证信号项的分辨率,但对于信号项周围交叉项的干扰不能得到有效抑制;SPWVD、SPEC、EMBD均能有效抑制交叉项,但SPWVD、SPEC损失了较多的信号分辨率以及时频聚集度,EMBD能在最大程度抑制交叉项干扰的同时,保证时频聚集度以及时频分辨率,能够精确地描述频率随时间变化的情况。通过分析可知,EMBD在激光多普勒信号探测领域,如物质共振频率分析、激光多普勒医疗等研究方向具有巨大的发展前景和优势。

## 参考文献:

- [1] WAZ A T, KACZMAREK P R, ABRAMSKI K M. Laser-fibre vibrometry at 1550 nm[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(10): 105301.
- [2] 甄佳奇, 仲维丹, 布音嘎日迪, 等. 正弦调制多光束激光外差测量压电材料电致伸缩系数[J]. *发光学报*, 2017, 38(12): 1661-1667.  
ZHEN J Q, ZHONG W D, BU Y, *et al.*. Piezoelectric material electrostriction coefficient measurement method combined sinusoidal modulation with multi-beam laser heterodyne[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(12): 1661-1667. (in Chinese)
- [3] 陈家键, 胡慧珠, 缪立军, 等. 双频激光干涉三自由度微振动测量系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1435-1443.  
CHEN J J, HU H ZH, MIAO L J, *et al.*. Three-degree-of-freedom micro-vibration measurement system based on dual-frequency laser interference[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1435-1443. (in Chinese)
- [4] GABOR D. Theory of communication. Part I: the analysis of information[J]. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering*, 1946, 93(26): 429-441.
- [5] ALMEIDA L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(11): 3084-3091.
- [6] COHEN L. Generalized phase-space distribution functions[J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1966, 7(5): 781-786.
- [7] BOASHASH B. *Time Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2003.
- [8] BOASHASH B, BEN-JABEUR T. Design of a high-resolution separable-kernel quadratic TFD for improving newborn health outcomes using fetal movement detection[C]. *Proceedings of the 2012 11th International Conference on Information Science, Signal Processing and Their Applications, IEEE*, 2012: 354-359.
- [9] VAN EEDEN W D, DE VILLIERS J P, BERNDT R J, *et al.*. Micro-Doppler radar classification of humans and animals in an operational environment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 102: 1-11.
- [10] GAO Y Q, CHEN W H, YANG B, *et al.*. Identifying users based on time-frequency characteristics[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1302(4): 042035.

- [11] LIU J L, WANG S F, ZHENG J Y, *et al.*. Time-frequency signal processing for integrity assessment and damage localization of concrete piles[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, 20(2): 2050020.
- [12] MAJHI S, MUKHERJEE A, GEORGE N V, *et al.*. Corrosion detection in steel bar: a time-frequency approach[J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 102150.
- [13] QI P F, WANG Y C. Seismic time-frequency spectrum analysis based on local polynomial Fourier transform[J]. *Acta Geophysica*, 2020, 68(1): 1-17.
- [14] IMADUDDIN S M, LAROVERE K L, KUSSMAN B D, *et al.*. A time-frequency approach for cerebral embolic load monitoring[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2020, 67(4): 1007-1018.
- [15] 谢斌, 夏立新. 伪Wigner-Ville分布在心电信号时频分析中的应用[J]. *现代信息科技*, 2019, 3(12): 56-57, 60.  
XIE B, XIA L X. Application of pseudo Wigner-Ville distribution in time-frequency analysis of ECG signals[J]. *Modern Information Technology*, 2019, 3(12): 56-57, 60. (in Chinese)
- [16] 饶震红, 王明安, 陈慕慕, 等. 柠檬黄与玉米醇溶蛋白的相互作用研究[J]. *发光学报*, 2019, 40(4): 511-519.  
RAO ZH H, WANG M A, CHEN ZH ZH, *et al.*. Interaction between tartrazine and zein[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(4): 511-519. (in Chinese)
- [17] 王云鹏, 胡以华, 雷武虎, 等. 基于激光回波时频图纹理特征的飞机目标分类方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1128004.  
WANG Y P, HU Y H, LEI W H, *et al.*. Aircraft target classification method based on texture feature of laser echo time-frequency image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1128004. (in Chinese)
- [18] 王云鹏, 胡以华, 雷武虎, 等. 典型旋翼形状参数微多普勒激光探测计算方法[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0906003.  
WANG Y P, HU Y H, LEI W H, *et al.*. Algorithm of typical rotor shape parameters by micro-Doppler laser detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0906003. (in Chinese)
- [19] LÜ T, GUO J, ZHANG H Y, *et al.*. Acquisition and enhancement of remote speech signals[J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(4): 275-278.
- [20] KURVINEN E, JOHN M, MIKKOLA A. Measurement and evaluation of natural frequencies of bulk ice plate using scanning laser Doppler vibrometer[J]. *Measurement*, 2020, 150: 107091.
- [21] 李晴棉, 李也凡, 何大伟, 等. 光外差信号接收机[J]. *发光学报*, 1998, 19(1): 82-84.  
LI Q M, LI Y F, HE D W, *et al.*. Optic heterodyning electronic signals receiving device[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 1998, 19(1): 82-84. (in Chinese)
- [22] 张晓琳, 唐文彦, 孙和义. 水下声信号的激光干涉测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 809-815.  
ZHANG X L, TANG W Y, SUN H Y. Laser interferometry of underwater acoustic signals[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 809-815. (in Chinese)
- [23] 刘立生, 张合勇, 王挺峰, 等. 激光外差探测对振动目标多普勒频谱成像[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1508-1515.  
LIU L SH, ZHANG H Y, WANG T F, *et al.*. Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1508-1515. (in Chinese)
- [24] JONES D L, PARKS T W. A high resolution data-adaptive time-frequency representation[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990, 38(12): 2127-2135.

#### 作者简介:



陈鸿凯(1995—), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 2017年于山东大学获得学士学位, 主要从事激光多普勒雷达探测及雷达信号处理方面的研究。E-mail: chenhk\_sdu@163.com



王挺峰(1977—), 男, 山东文登人, 博士, 研究员, 博士生导师, 1999年于原吉林工业大学获得学士学位, 2002年于吉林大学获得硕士学位, 2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事激光应用与光电总体方面的研究。E-mail: wangtingfeng@ciomp.ac.cn