

激光多普勒测振啁啾噪声分析及其抑制方法

王亚豪^{1,2}, 沈杨翊^{1,2}, 孔新新^{1,2}, 张文喜^{1,2*}¹中国科学院空天创新信息研究院, 北京 100094;²中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 根据外差激光多普勒测振过程的物理原理,分析了其在目标存在低频高速运动情况下测量高频低速振动的过程。在这一过程中,因杂散光而产生的测量噪声表现出啁啾特性,该研究还阐明了这种噪声的影响和表现形式、特点。针对此啁啾噪声,提出了一种微分预理解调方法,理论分析表明这种解调方法有明显的啁啾噪声抑制效果,并进一步进行了仿真和实验验证。搭建了存在杂散光的外差激光多普勒测振系统,对目标振动进行了测量,分别通过常规解调方法和微分预理解调方法进行解调,实验结果验证了啁啾噪声的存在和微分预理解调方法抑制啁啾噪声的有效性,该方法可使啁啾噪声功率下降约81.8%,可有效降低杂散光对测量结果的影响。

关键词 信号处理; 激光多普勒测振; 啁啾噪声; 杂散光; 微分预处理

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231838

1 引言

外差激光多普勒测振技术通过外差干涉方式,利用多普勒效应获取待测物体的运动信息,具有非接触、响应速度快、无损伤、分辨率高等优点^[1-3],在成分检测^[4]、结构检测^[5-6]、医学监测^[7-10]等方面有着广泛的应用场景。

针对外差激光多普勒测振系统,研究者们分析了多种噪声来源,如幅度调制^[11]、频率漂移^[12]、散斑噪声^[13-14]、散粒噪声^[15]和背景运动^[16]等。然而,在一种特定的测量需求——存在低频高速运动的情况下,对高频低速振动进行测量——的情况下(例如,对悬停直升机螺旋桨转轴、流水线上物体的高频振动进行实时测量),对杂散光产生噪声分析和抑制方法尚缺乏针对性的研究,因此本文将针对这种测量需求,对杂散光所产生的噪声的形式和性质等进行分析,并提出了一种针对性的抑制方法。

杂散光的可能来源较多,其中一些离轴方向上的杂散光可以通过吸收或偏折的方式进行抑制^[17],但一些光学器件的折、反射产生的轴向杂散光将与测量光和参考光形成多光束干涉,从而带来测量误差。本文针对其中一种典型轴向杂散光——镜头后向反射光的存在,分析了其与测量光、参考光发生三光束干涉的情况,以及这种情况下其产生的测量误差的原理。

在分析了杂散光产生测量误差的基础上,本文针

对特定的测量需求进行了理论分析,论证了此时杂散光导致的测量误差将以啁啾噪声的表现形式出现,并通过仿真程序直观展现了这种啁啾噪声的表现形式,并分析了其特点。

在明确了该啁啾噪声的产生原因和特点的基础上,本文提出了一种基于对原始信号进行微分预处理的新解调方法(以下称微分预处理方法),该方法可对该啁啾噪声进行抑制。本文通过仿真程序和实验验证,证明了这种微分预处理方法能够有效地抑制啁啾噪声。该方法有望在一些运动测量场景,例如对运动状态下的精密器件的高频振动模态分析中,起到明显的作用。

2 基本原理

2.1 外差激光多普勒测振信号解调原理

一种外差激光多普勒测振仪的基本结构如图1所示。该装置中,信号光与参考光合束干涉,参考光经过声光移频器(AOM)的调制,而信号光经过待测物体的反射,其相位项中含有包含了物体运动信息的多普勒相移量,将其记作 $\varphi_{\text{dop}}(t)$ 。实际测量时,通过一个合理的滤波器对干涉信号进行滤波,只保留差频项。假设AOM的调制频率(以角频率表示)为 ω_m 。设信号光与参考光的初相位差为 φ_s ,参考光初相位设为0,信号光与参考光的场强分别为 E_s 和 E_r ,则信号光与参考光干涉产生的差频项为 $E_s E_r \cos[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s - \omega_m t]$,在

收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2023-12-18; 录用日期: 2023-12-29; 网络首发日期: 2024-01-09

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0706300)、中国科学院青年创新促进会项目(2020131, 2023132)

通信作者: *zhangwx@aircas.ac.cn

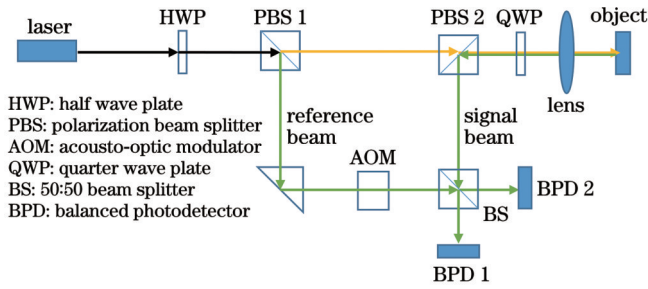


图1 一种典型外差激光多普勒测振仪的主要组成部分示意图
Fig.1 Schematic of the main composition of a typical heterodyne laser Doppler vibrometer

得到差频项之后,需要对其进行解相位,以获取多普勒相移量 $\varphi_{\text{dop}}(t)$ 。一种典型方式是通过反正切 (ARCTAN)方法求解^[18],其主要过程如下所示。

首先,将差频项分别乘以角频率为调制频率 ω_m 的正弦信号和余弦信号。之后,对这两项乘积信号进行低通滤波,将高频信号滤去,这样就只剩下了包含多普勒相移信息的正、余弦项,即

$$Q = \frac{1}{2} E_s E_r \sin[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s], \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{2} E_s E_r \cos[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s], \quad (2)$$

之后通过反正切即可获得多普勒相移量 $\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s$:

$$\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s = \arctan \frac{Q}{I}, \quad (3)$$

获取多普勒相移量 $\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s$ 之后,可以根据它获取物体的运动信息,如位移、速度等,通过滤波方式就可以从中获得不同频率范围的运动信息。

2.2 杂散光存在导致解调相位误差原理

在激光多普勒测振仪中,一些特定的杂散光将会以多光束干涉的形式影响测量过程,如图1中收发镜头组的后向反射光,该光未通过声光移频器,也不包含待测物体运动带来的多普勒频移成分,频率成分与信号光相近,解调过程不会被滤波器滤除;同时,由于它和信号光的偏振态一致,因此在经过偏振分光棱镜 (PBS) 后,光强度不会产生较大的衰减,其进入平衡探测器后将与参考光和信号光发生多光束干涉。则在平衡探测器中得到的光电流为三光束干涉的结果,滤波后,直流项和信号光与杂散光形成的差频项均被滤除,只剩另外两个差频项,其表达式为

$$E_s E_r \cos[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s - \omega_m t] + E_r E_n \cos(\varphi_n - \omega_m t), \quad (4)$$

式中: E_n 为杂散光场强; φ_n 为杂散光相位。仍使用 ARCTAN 法对其进行解调,此时得到的正余弦项为

$$Q = \frac{1}{2} E_s E_r \sin[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s] + \frac{1}{2} E_r E_n \sin \varphi_n, \quad (5)$$

$$I = \frac{1}{2} E_s E_r \cos[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s] + \frac{1}{2} E_r E_n \cos \varphi_n, \quad (6)$$

之后再求取反正切,就得到了解调相位,将其记为

$$\varphi_{\text{demo}}(t):$$

$$\varphi_{\text{demo}}(t) = \arctan \frac{Q}{I} = \arctan \frac{\sin[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s] + \frac{E_n}{E_s} \sin \varphi_n}{\cos[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s] + \frac{E_n}{E_s} \cos \varphi_n}, \quad (7)$$

显然,此时解调得到的相位 $\varphi_{\text{demo}}(t)$ 并不是多普勒相移量 $\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s$,二者存在一定的偏差。根据式(7),不难看出,影响多普勒相移量 $\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s$ 与解调相位 $\varphi_{\text{demo}}(t)$ 之间的误差的独立变量实际只有两个:一个是杂散光与信号光场强之比 $\frac{E_n}{E_s}$,将其称为场强比值,以 a 表示;另一个是多普勒相移量与杂散光初相位的差 $\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s - \varphi_n$,将其称为误差相位,以 $\Delta\varphi$ 表示。

2.3 解调速度与真实速度之间的误差——啁啾噪声

物体位移和相位之间存在线性关系,因此式(7)说明解调位移与真实位移存在误差,但考虑到式(7)的表示形式较为复杂,将其转化为速度之间的关系进行分析。将目标物体的真实运动速度记作 $v_{\text{real}}(t)$ 。而利用解调相位 $\varphi_{\text{demo}}(t)$ 所得到的速度称为解调速度,记作 $v_{\text{demo}}(t)$ 。将式(7)两侧对时间 t 求微分(假定此时 E_s, E_n, φ_n 都不随时间变化),可得解调速度 $v_{\text{demo}}(t)$ 与真实速度 $v_{\text{real}}(t)$ 的关系为

$$\frac{d\varphi_{\text{demo}}}{dt} = \frac{1 + \frac{E_n}{E_s} \cos[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s - \varphi_n]}{1 + \left(\frac{E_n}{E_s}\right)^2 + 2\frac{E_n}{E_s} \cos[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s - \varphi_n]} \times \frac{d[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s]}{dt},$$

$$v_{\text{demo}}(t) = \frac{1 + a \cos \Delta\varphi}{1 + a^2 + 2a \cos \Delta\varphi} \cdot v_{\text{real}}(t), \quad (8)$$

即解调速度 $v_{\text{demo}}(t)$ 与真实速度 $v_{\text{real}}(t)$ 之间存在实时的比例关系,将该比例系数称为速度比率 $\eta(t)$,即

$$\eta(t) = \frac{1 + a \cos \Delta\varphi}{1 + a^2 + 2a \cos \Delta\varphi}. \quad (9)$$

根据式(9),速度比率 $\eta(t)$ 随场强比值 a 和误差相位 $\Delta\varphi$ 的变化而变化,具体来说,其随信号光场强 E_s 、杂散光场强 E_n 、杂散光相位 φ_n 和多普勒相移量 $\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s$ 的变化而变化。根据其各自的产生来源,杂散光场强 E_n 和杂散光相位 φ_n 几乎不变化,而在大多数时刻下,信号光场强 E_s 变化小,多普勒相移量 $\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s$ 变化大,因此,除非在待测物体速度接近 0 时,可以认为,误差相位 $\Delta\varphi$ 的瞬时变化速度为

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = \frac{d[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s - \varphi_n]}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot v_{\text{real}}(t), \quad (10)$$

而在信号光场强 E_s 变化极其剧烈时,可以认为,场强

比值 a 变化轻微, 速度比率 $\eta(t)$ 的变化只与误差相位 $\Delta\varphi$ 的变化有关。而根据式(9), 误差相位 $\Delta\varphi$ 每变化 2π 弧度, 速度比率 $\eta(t)$ 即变化一个周期, 因此, 速度比率 $\eta(t)$ 的变化频率为

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} \cdot \frac{1}{2\pi} = \frac{2|v_{\text{real}}(t)|}{\lambda}, \quad (11)$$

显然, 速度比率 $\eta(t)$ 的变化频率是跟随着物体的真实速度 $v_{\text{real}}(t)$ 实时变化的。因此, 在一个短时间内, 速度比率 $\eta(t)$ 所带来的解调误差, 也将以一种频率为 $\frac{2|v_{\text{real}}(t)|}{\lambda}$ 的噪声的方式展现, 这种噪声的频率随着待测物体的运动速度的变化而实时变化, 这是典型的啁啾现象, 该噪声即为杂散光导致的啁啾噪声。

而当物体的运动是由低频高速背景运动和高频低速待测运动组合而成时, 根据式(11), 大部分时刻下, 低频高速背景运动产生的啁啾噪声将会处于较高的频段, 此时即使通过滤波, 也无法辨别滤波后的解调速度中的哪些成分来自待测运动, 哪些来自背景运动的啁啾噪声, 这必然会严重影响对高频低速运动信息的测量, 因此有必要对啁啾噪声进行抑制或去除。

2.4 微分预处理方法抑制啁啾噪声原理

根据 ARCTAN 法的解调原理, 啁啾噪声的产生是解调所用的正余弦项中多了和杂散光有关的正余弦项。基于这一点, 提出了一种新的解调方式, 由于其本质是将正余弦项通过微分方式进行预处理, 因此将其称为微分预处理方法(DPM)。此方法的前置部分与常规 ARCTAN 解调方法相同, 区别如下。

获取正余弦项之后, 对式(5)和(6)求时间 t 的微分(仍然假定此时 E_s 、 E_n 、 φ_n 都基本不随时间变化), 可得

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{2} E_s E_r \cos[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s] \cdot \frac{d\varphi_{\text{dop}}(t)}{dt}, \quad (12)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{1}{2} E_s E_r \sin[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s] \cdot \frac{d\varphi_{\text{dop}}(t)}{dt}. \quad (13)$$

记新的解调相位为 $\varphi_{\text{demo2}}(t)$, 其表达式为

$$\varphi_{\text{demo2}}(t) = \arctan \frac{-dI/dt}{dQ/dt} = \arctan \frac{\sin[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s]}{\cos[\varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s]} = \varphi_{\text{dop}}(t) + \varphi_s, \quad (14)$$

此时的新解调相位 $\varphi_{\text{demo2}}(t)$ 与多普勒相移量完全一致。

实际应用时, 需要考虑 E_s 、 E_n 、 φ_n 随时间的变化, 但当待测物体运动的瞬时速度较大时, 式(14)仍近似成立, 而当待测物体的运动速度接近 0 时, 产生的啁啾噪声就会处于较低频段, 不会影响对高频低速待测运动的测量, 此时可以选用常规解调方法的结果替换掉微分预处理方法的结果。

3 仿真分析

通过 MATLAB 程序, 对存在杂散光和低频高速背景运动的情况下测量物体高频低速的待测运动时常规解调方法所产生的啁啾噪声的效果, 以及微分预处理方法对啁啾噪声的抑制作用进行仿真。仿真中, 选取一个振幅为 10 nm、频率为 10 kHz 的正弦运动作为待测物体的待测运动, 而附加的背景运动为一个振幅为 5 mm、频率为 0.5 Hz 的正弦运动, 信号光与杂散光的场强比值 a 设为 0.1, 激光波长设置为 1550 nm。

通过常规解调方法和微分预处理方法, 可以得到两个不同的解调结果。对常规方法解调速度、微分预处理方法解调速度的高频部分进行短时傅里叶变换, 获取它们的时频图。为了使显示效果更明显, 图 2 中将强度转化为对数显示, 以 dB 为单位, 其计算方式为 $n = 20 \lg \frac{p}{p_0}$, 其中 n 为强度值, p 为速度在对应

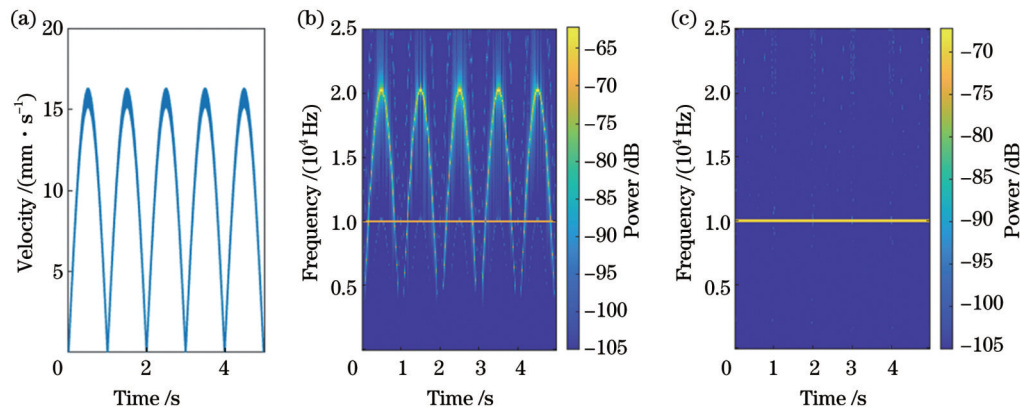


图 2 仿真结果。(a) 常规方法得到的解调速度的绝对值; (b) 常规方法得到的解调速度的时频图; (c) 微分预处理方法得到的解调速度时频图

Fig. 2 Simulation results. (a) Absolute value of demodulated velocity obtained by normal method; (b) spectrogram of demodulated velocity obtained by normal method; (c) spectrogram of demodulated velocity obtained by DPM

频段内的幅值强度,单位取 m/s , $p_0=1 \text{ m/s}$,为归一化量。

从时频图中可以发现,在有杂散光的情况下,常规方法得到的解调速度的时频图中出现了额外的谱线,这就是啁啾噪声的直观体现,其与物体的正弦背景运动对应,直观地验证了式(11);而从微分预处理方法的解调结果中可以看出,啁啾噪声对应的谱线被成功地去除,只保留了待测运动对应谱线。

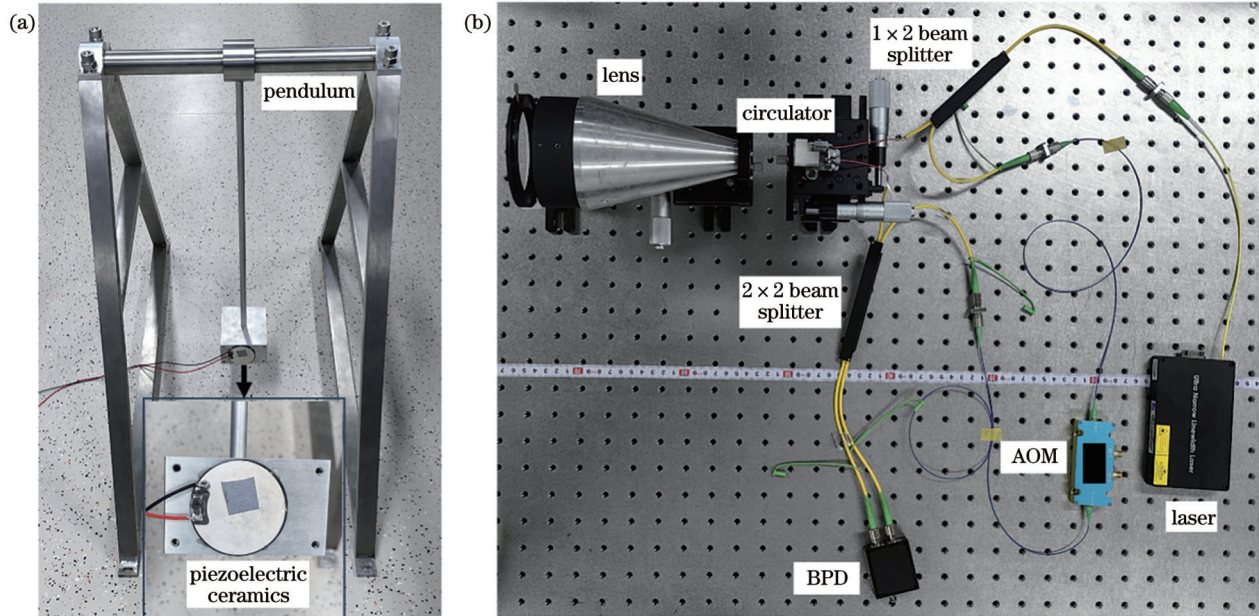


图 3 微分预处理方法验证实验实物图。(a)测量目标;(b)测量系统

Fig. 3 Verification experiment objects of derivative preprocessing method. (a) Measurement target; (b) measurement system

图 3 中的激光器波长为 1550 nm ,声光移频器的调制频率为 50 kHz 。其余器件的功能作用与图 1 中的对应器件基本一致,系统的测量原理已在前文中说明,不再赘述。

图 3 中的实验测量目标的主体是一个固定在摆装置的摆锤上的压电陶瓷片,摆锤运动方向与测量系统的光轴方向基本相同。该实验装置的摆长约为 0.5 m ,对应的运动周期约为 1.42 s ,即频率约为 0.7 Hz ,将摆锤的运动作为实验中的低频高速背景运动。

在实验过程中,通过给压电陶瓷片施加频率为 10 kHz 、电压峰峰值为 1 V 的单频正弦电激励,使其产生基频为 10 kHz 的运动, 10 kHz 基频运动的速度相对摆锤的摆动来说属于高频低速运动。

实验时,先将实验装置布置在测振系统镜头外约 5 m 的位置,调整测振系统以使得测量光能够在摆锤自然悬垂、静止不动时,聚焦在压电陶瓷片表面中心附近。将摆锤由自然悬垂状态向一旁拨动约 1 cm 并固定,确认此时测量光仍能照射在压电陶瓷片表面上,之后通过信号发生器向压电陶瓷片施加电激励,并快速解除对摆锤的固定,摆开始运动。

摆开始运动后,通过该外差激光多普勒测振系统

4 实验验证

4.1 实验设置

为了验证前文中对啁啾噪声的相关分析的正确性,以及微分预处理方法对抑制啁啾噪声的效果,搭建了一套外差激光多普勒测振系统进行验证实验。实验实物如图 3 所示,为了易于辨识,测量系统中未接入供电线和传输线。

对待测目标进行测量,并使用图 4 中的平衡探测器将采集到的光信号转换为电信号。采集到的信号通过采集卡被上位机接收,以 200 kHz 的采样频率进行采样,直至肉眼基本观察不到摆的运动时,停止采集,通过常规解调方法对其进行解调。

4.2 实验结果及分析

根据常规解调结果,剔除了速度过大或过小的部分数据,对剩余部分的数据分别使用常规解调方法和微分预处理方法进行解调,并对微分预理解调结果在 0 速度附近处进行部分替换。图 4 为通过常规方法得到的解调速度的绝对值,以及常规解调方法、微分预处理方法(部分替换后)分别得到的速度时频图之间的对比(速度时频图中的强度单位与图 2 的一致)。

可以明显地看出,图 4(a)中运动速度的绝对值与图 4(b)中的啁啾噪声谱线是完全一致的,这再次验证了式(11)所表明关系;而在图 4(c)中,这种啁啾噪声得到了很好的抑制, 10 kHz 处的待测速度得以凸显。

从图 4 中可以看出,在速度较大时,啁啾噪声较为明显,尤其是在 10 kHz 以上处。通过比较常规方法的解调速度和部分替换后的微分预处理方法的解调速度

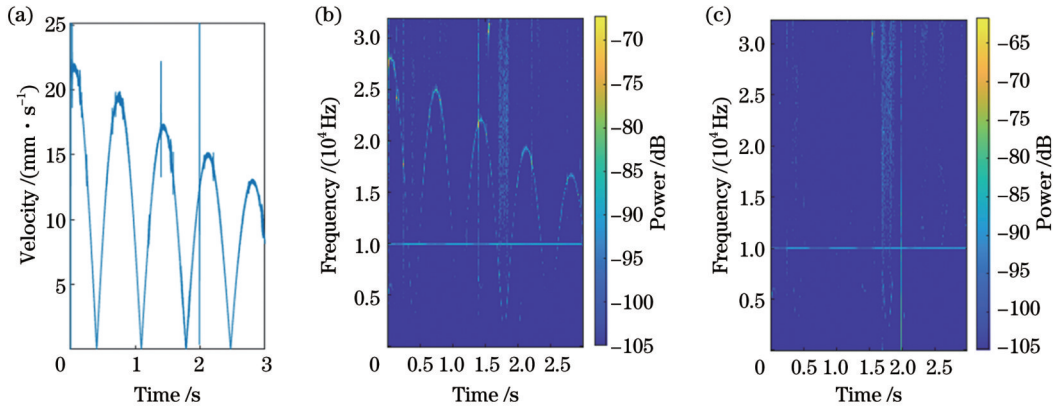


图4 验证实验结果图。(a)常规方法得到的解调速度绝对值;(b)常规方法得到的解调速度时频图;(c)部分替换后的微分预处理方法得到的解调速度时频图

Fig. 4 Verification experiment results. (a) Absolute value of demodulated velocity obtained by normal method; (b) spectrogram of demodulated velocity obtained by normal method; (c) spectrogram of demodulated velocity obtained by DPM after partial replacement

在 10 kHz 以上的功率谱密度的差别,可以看出微分预处理方法对啁啾噪声的有效抑制效果,如图 5 所示。

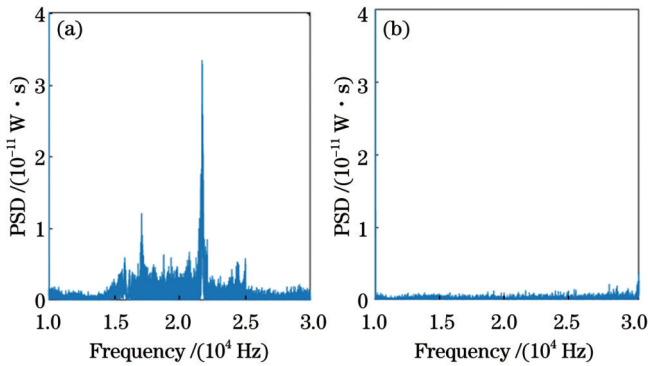


图5 两种方法所得解调速度的功率谱密度。(a)常规方法得到的解调速度的功率谱密度;(b)部分替换后的微分预处理方法得到的解调速度的功率谱密度

Fig. 5 Power spectral density (PSD) of demodulated velocity of two methods. (a) PSD of demodulated velocity of normal method; (b) PSD of demodulated velocity of DPM after partial replacement

从图 5 中可以看出,在 10 kHz 以上,噪声功率明显下降。对比二者在 10 kHz 以上频段内的积分值可发现,部分替换后的微分预处理方法的结果相比常规方法的解调结果下降了约 81.8%。

5 结 论

本文通过深入分析外差式激光多普勒测振仪的工作原理、常用解调方法等,针对有低频高速背景运动情况下,对高频低速振动进行测量的需求,得到了因杂散光而产生啁啾噪声的原理和表现形式,并通过仿真对其进行了验证。理论分析和仿真结果表明,这种情况下因镜头后向反射的杂散光而产生的啁啾噪声,其瞬时频率与目标物体的瞬时运动速度成正比,与激光波

长成反比。在有低频高速背景运动的情况下,这种啁啾噪声会对高频低速振动的测量产生严重干扰。

在此基础上,本文提出了一种全新的解调方法——微分预处理方法。仿真和实验结果表明,这种方法对啁啾噪声有明显的抑制效果。开展了激光多普勒测振实验,对摆动中的压电陶瓷片进行了测量,并使用常规解调方法和微分预处理方法分别进行解调。实验结果验证了啁啾噪声的存在,且其表现形式及特点和理论分析结果一致;而微分预处理方法也起到了对啁啾噪声明显的抑制,可使啁啾噪声功率下降约 81.8%。

本文的研究内容还存在一定的局限性。首先,本文仅针对杂散光这一因素产生的噪声进行了分析,而未考虑其他因素对测量结果的影响,因此所得结果必然会与实际情况有一定的偏差。其次,本文提出的微分预处理方法的有效性是建立在回光功率较为稳定的情况下的,而在光强剧烈变化的环境下,这种方法的处理效果会下降。因此还需对其他噪声来源和光强变化等因素进行分析,完善相关模型,对微分预处理方法进行调整,以提高这种解调方法的鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] 张洪玮, 吴松华, 刘金涛, 等. 激光多普勒测速技术在海洋微尺度湍流测量中的可行性分析[J]. 光学学报, 2023, 43(24): 2401011.
Zhang H W, Wu S H, Liu J T, et al. Feasibility analysis of laser Doppler velocimetry in ocean micro-scale turbulence measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(24): 2401011.
- [2] 陈兰剑, 席崇宾, 周健, 等. 无人机机载激光多普勒测速仪研究与飞行验证[J]. 光学学报, 2023, 43(17): 1712002.
Chen L J, Xi C B, Zhou J, et al. Research and flight test on airborne laser Doppler velocimeter for unmanned aerial vehicles[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(17): 1712002.
- [3] 张弛, 王顺, 关向雨, 等. 激光多普勒测振技术应用的新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 1900006.
Zhang C, Wang S, Guan X Y, et al. New progress in

- application of laser Doppler vibration measurement technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(19): 1900006.
- [4] 刘晓利, 王紫薇, 傅愉. 基于远距离激光测振仪的痕量危险品探测[J]. *光学学报*, 2023, 43(13): 1312005.
Liu X L, Wang Z W, Fu Y. Trace hazardous substance detection based on long-distance laser vibrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(13): 1312005.
- [5] Maio L, Ricci F, Memmolo V, et al. Application of laser Doppler vibrometry for ultrasonic velocity assessment in a composite panel with defect[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 1030-1039.
- [6] Balasubramaniam K, Fiborek P, Ziaja D, et al. Global and local area inspection methods in damage detection of carbon fiber composite structures[J]. *Measurement*, 2022, 187: 110336.
- [7] Fredriksson I, Larsson M. On the equivalence and differences between laser Doppler flowmetry and laser speckle contrast analysis[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, 21(12): 126018.
- [8] Sorelli M, Francia P, Bocchi L, et al. Assessment of cutaneous microcirculation by laser Doppler flowmetry in type 1 diabetes [J]. *Microvascular Research*, 2019, 124: 91-96.
- [9] Dremir V, Kozlov I, Volkov M, et al. Dynamic evaluation of blood flow microcirculation by combined use of the laser Doppler flowmetry and high-speed videocapillaroscopy methods[J]. *Journal of Biophotonics*, 2019, 12(6): e201800317.
- [10] 许越, 聂立铭. 光学成像技术在中医针刺研究中的应用进展 [J]. *中国激光*, 2023, 50(3): 0307105.
Xu Y, Nie L M. Application of optical imaging for studying Chinese acupuncture: a review[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(3): 0307105.
- [11] 鹿彤彤, 陆彦婷, 杜福嘉, 等. 瞳面干涉激光多普勒测振[J]. *光学学报*, 2022, 42(15): 1512005.
Lu T T, Lu Y T, Du F J, et al. Laser Doppler vibrometry based on pupil-plane interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(15): 1512005.
- [12] Yang H X, Yin Z Q, Yang R T, et al. Design for a highly stable laser source based on the error model of high-speed high-resolution heterodyne interferometers[J]. *Sensors*, 2020, 20(4): 1083.
- [13] Lü T, Han X Y, Wu S S, et al. The effect of speckles noise on the Laser Doppler vibrometry for remote speech detection[J]. *Optics Communications*, 2019, 440: 117-125.
- [14] Jin Y, Dollevoet R, Li Z L. Numerical simulation and characterization of speckle noise for laser Doppler vibrometer on moving platforms (LDVom) [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 158: 107135.
- [15] 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): 1011002.
Pu M Y, Hu Y H, Qu F H, et al. Signal processing method of photon echoes heterodyne for variable-speed target[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(10): 1011002.
- [16] Jiang L A, Albota M A, Haupt R W, et al. Laser vibrometry from a moving ground vehicle[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(15): 2263-2273.
- [17] 邵晶, 李卓, 聂真威, 等. 抑制光学系统中杂散光的非对称微结构的设计与加工[J]. *光学学报*, 2023, 43(11): 1122001.
Shao J, Li Z, Nie Z W, et al. Design and fabrication of asymmetric microstructure for stray light suppression in optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(11): 1122001.
- [18] 肖文哲, 程静, 张大伟, 等. 用于光纤干涉传感器的高稳定 PGC 解调技术[J]. *光电工程*, 2022, 49(3): 210368.
Xiao W Z, Cheng J, Zhang D W, et al. High stability PGC demodulation technique for fiber-optic interferometric sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(3): 210368.

Chirp Noise Analysis in Laser Doppler Vibration Measurement and Its Suppression Methods

Wang Yahao^{1,2}, Shen Yangyi^{1,2}, Kong Xinxin^{1,2}, Zhang Wenxi^{1,2*}

¹*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

²*School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Objective Based on the physical principle of the heterodyne laser Doppler vibration measurement process, we analyze the measurement process of high-frequency and low-speed movement in the presence of low-frequency and high-speed background movement. In the process, the measurement noise generated by the presence of stray light exhibits chirp characteristics, with the effects and patterns of chirp noise explained. In response to the chirp noise, we propose a derivative preprocessing method for demodulation. The theoretical analysis shows the method exerts a significant effect on suppressing chirp noise, which is verified by simulations and experiments. Meanwhile, we set a heterodyne laser Doppler vibration measurement system with stray light and measure the target vibration. The normal method and derivative preprocessing method are adopted respectively for demodulation. The experimental results verify the existence of chirp noise and the effectiveness of the derivative preprocessing method in suppressing chirp noise, which decreases the chirp noise power by about 81.8%. The method can effectively reduce the influence of stray light on vibration measurement.

Heterodyne laser Doppler vibration measurement technology is a widely adopted non-contact and non-destructive movement measurement method, with the advantages of fast response speed and high resolution. It has a strong detection ability for single frequency movement and can quickly identify the characteristic frequency of target movement. However,

in the presence of low-frequency high-speed background movement, the measurement of high-frequency low-speed movement is severely affected by chirp noise, which is caused by stray light and closely related to low-frequency high-speed background movement. The chirp noise can seriously affect the measurement of high-frequency low-speed movement, with errors even reaching tens of times larger than those of real movement. There is a lack of research on the principle of chirp noise caused by stray light and suppression methods of chirp noise. We deeply analyze the principle of chirp noise caused by stray light and propose a novel demodulation method called the derivative preprocessing method (DPM). This demodulation method is easy to implement and exhibits a good effect for suppressing chirp noise. This demodulation method is expected to provide a reliable noise suppression method for measuring high-frequency low-speed movement in the presence of low-frequency high-speed background movement. This plays a significant role in analyzing high-frequency vibration modes of precision devices in some special measurement scenarios, such as in the presence of background movement.

Methods Our study consists of theoretical analysis, simulation, and experimental verification. Firstly, the working principle and demodulation method of the heterodyne laser Doppler vibration measurement system, which is in the presence of stray light, are deeply analyzed. According to the analysis, the stray light would generate chirp noise in the process of normal demodulation method (ARCTAN). Based on the generation and characteristics of the chirp noise, a new demodulation method DPM is proposed. Then, the influence of chirp noise on the measurement of target movement velocity and the effect of DPM on chirp noise suppression are simulated. In the simulation, a low-frequency sinusoidal movement is utilized as the background movement, while a high-frequency sinusoidal movement is employed as the target movement. In the simulation, the background movement generates corresponding chirp noise to affect demodulation results severely. The normal demodulation method DPM is leveraged to restore the target movement by demodulating the overall movement and performing high-pass filtering. Finally, a heterodyne laser Doppler vibration measurement experiment is conducted to utilize a piezoelectric ceramic plate fixed on the pendulum device. In the experiment, the piezoelectric ceramic plate vibrates at a single and high frequency, which is regarded as the target movement, and the pendulum's movement is considered as the background movement. According to the experiment results, the existence of chirp noise is verified, and the DPM suppresses the chirp noise too.

Results and Discussions In the process of the normal demodulation method (ARCTAN), the cause of chirp noise is the combination of stray light and background movement. The frequency of chirp noise changes in real time with the background movement speed, and specifically, it is proportional to the absolute speed of background movement and inversely proportional to the laser wavelength (Formula 11). When the background movement is low-frequency high-speed movement and the target movement is high-frequency low-speed movement, the chirp noise will seriously affect the measurement of high-frequency part movement [Fig. 2(b)]. Compared with the normal demodulation method, DPM can effectively restore target movement [Fig. 2(c)], but will generate erroneous velocity spikes in the positions that are near zero speed locations. Since adopting the normal demodulation method's results to partly replace the demodulation results of the DPM at the corresponding positions (near zero speed locations), the velocity spikes can be suppressed, and the demodulation results approach target movement more closely. In the experiment, the background movement of the pendulum indeed generates corresponding chirp noise [Figs. 4(a) and (b)], and DPM can effectively suppress the chirp noise [Fig. 4(c)]. DPM has a significant suppression effect on chirp noise, which reduces the power of chirp noise by about 81.8% at the peak of the chirp noise (Fig. 5).

Conclusions The principle of heterodyne laser Doppler vibration measurement is deeply analyzed. It is pointed out that chirp noise is generated due to stray light and background movement. The frequency of the chirp noise changes in real time with the background movement speed, which is proportional to the absolute background movement speed and inversely proportional to the laser wavelength. Simulations and experiments have confirmed the existence of chirp noise and its frequency variation pattern. A novel demodulation method DPM has been proposed for this type of chirp noise. Simulations and experiments prove that DPM can effectively suppress chirp noise. Above the target movement frequency, the chirp noise power can be reduced by about 81.8%.

Key words signal processing; laser Doppler vibration measurement; chirp noise; stray light; derivative preprocessing