

doi: 10.3788/gzxb20124110.1149

# 基于双声光移频器的外差式激光多普勒测振计

尚建华<sup>1</sup>, 任立红<sup>1</sup>, 徐海芹<sup>1</sup>, 赵曙光<sup>1</sup>, 贺岩<sup>2</sup>

(1 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所 中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室, 上海 201800)

**摘 要:**分析了单声光移频器构成的外差式激光多普勒测振计中声光移频器驱动信号的频率稳定性和信号功率对待测振动信号的影响. 为了降低声光移频器驱动信号频率漂移的影响, 提出双声光移频器构成的外差式激光多普勒测振计, 并基于直接数字频率合成技术, 以相位噪音低、初始相位可控的芯片 AD9912 为核心器件, 完成了声光移频器驱动信号生成及处理模块的设计. 开展了双声光移频器组成的外差式激光多普勒测振计的振动测量实验, 结果表明, 驱动信号生成装置可以驱动声光移频器正常工作, 且测振计的本底噪音在 0~10 kHz 频带范围内呈现平坦分布, 0~1 kHz 频段内噪音得到明显抑制, 较单声光移频器构成的外差式激光多普勒测振计有显著改善.

**关键词:**外差式激光多普勒测振计; 声光移频器; 直接数字频率合成

**中图分类号:** TN958.98; TN74

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)10-1149-7

## 0 引言

激光多普勒振动测量技术可以实现各种微弱振动目标运动速度的远距离、非接触实时测量, 能够通过测量声信号传播引起的界面振动特性还原原始频率信息, 实现声光通信<sup>[1-5]</sup>. 相对传统的声信号探测手段而言, 基于激光多普勒测振计的声光通信方式具有更好的灵活性、机动性和保密性, 能够克服工作环境的限制.

激光多普勒测振计的工作原理是相干探测, 从检测方式上分为外差探测和零差探测两种, 相对零差探测方式而言, 外差探测提高了光电信号的信噪比, 增强了信号的抗干扰能力, 并且易于实现高分辨率测量. 当激光多普勒测振计工作在外差探测方式时, 必须要有固定的中频载波, 通常用声光移频器 (Acousto-Optic Frequency Shifter, AOFS) 实现这一目的. 声光移频器根据施加的驱动信号频率将激光频率上移或下移相应的频率, 进而在后期的光学相干检测中获得固定的中频载波信号. 针对微弱振动信号测量应用而言, 声光移频器射频驱动信号的频率稳定性和驱动功率直接决定着光学移频的准确性、光路的插入损耗和系统的测速准确度<sup>[6-8]</sup>. 因此, 合成高质量的声光移频器驱动信号是激光多普勒测振技术的关键技术之一.

本文分析了声光移频器驱动信号的信号功率及频率稳定性对单声光移频器构成的外差式激光多普勒测振计探测性能的影响. 为了克服声光移频器频率漂移的影响, 提出由双声光移频器构成的外差式激光多普勒测振计 (Heterodyne Laser Doppler Vibrometry, HLDV) 结构. 在此基础上, 介绍了基于直接数字频率合成技术 (Direct Digital Frequency Synthesis, DDS) 的声光移频器驱动信号的实现原理及方法. 最后, 通过振动特性测量实验证明了双声光移频器构成的 HLDV 能够准确还原频率信息, 并且测振计的本底噪音谱线以及系统的低频探测性能得到了显著改善.

## 1 声光移频器对 HLDV 的影响

### 1.1 一级衍射光功率与声光移频器驱动信号功率之间的关系

依据声光效应, 当驱动信号驱动声光晶体工作时, 驱动信号经压电换能器转换产生超声场, 该超声场和光场在声光晶体内相互作用形成体光栅, 进而造成入射激光发生衍射. 由于体光栅随声场同步运动, 因而激光的移频频率与外加驱动信号的频率相同. 固定驱动信号频率就可在本振光路和探测信号光路之间形成固定的差频, 实现外差探测系统. 根据超声频率和声光晶体厚度的不同, 声光晶体中的衍

**基金项目:**上海市教育委员会和上海市教育发展基金会“晨光计划”(No. 11CG36)和中央高校基本科研业务费专项资金(No. 12D10410)资助

**第一作者:**尚建华(1982-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为高精度激光多普勒测振技术. Email: jhshang@dhu.edu.cn

**收稿日期:**2012-05-16; **修回日期:**2012-06-18

射包括喇曼-奈斯衍射和布喇格衍射. 由于喇曼-奈斯衍射效率有限, 导致入射光衰减严重, 因此, 目前的声光移频器件主要通过布喇格衍射实现光信号的移频. 图 1 是声光移频器的工作示意图.

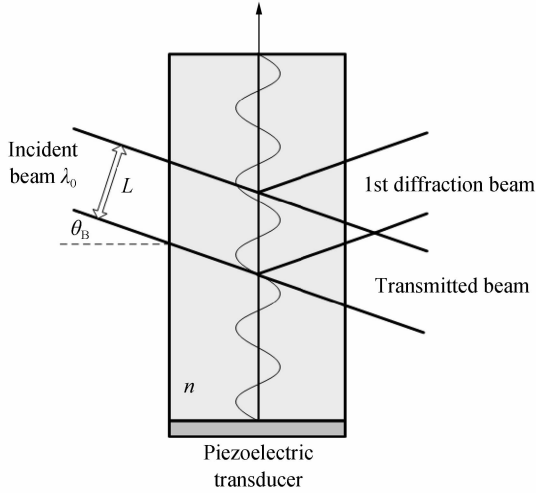


图 1 声光移频器工作示意图  
Fig. 1 Acousto-optic frequency shifter schematic

激光以布喇格角  $\theta_B$  斜入射到声光移频器上, 当发生布喇格衍射时, 由声光相互作用理论及晶体光学理论<sup>[9-10]</sup>可得一级衍射光强  $I_1$  为

$$I_1 = I_i \sin^2 \left( \sqrt{\frac{L\pi^2 P^2 n^6}{2H\rho\lambda_0^2 v_a^3}} P_a \right) \approx I_i \left( \frac{L\pi^2 P^2 n^6}{H\rho\lambda_0^2 v_a^3} \right) P_a \quad (1)$$

式中,  $I_i$  表示入射光光强,  $\lambda_0$  表示光波长,  $L, H$  表示声光移频器中换能器的长度和宽度,  $P$  表示声光系

数,  $n, \rho$  表示声光晶体的折射率和密度,  $P_a$  表示驱动信号经压电换能器作用后在声光晶体上产生的声波功率,  $v_a$  表示声速.

由式(1)可知, 声光移频器的一级衍射光强正比于声波信号功率  $P_a$ , 且声波功率  $P_a$  随驱动信号功率变化. 因此, 为了降低声光移频器在 HLDV 中引入的插入损耗, 获得稳定的一级衍射光功率, 声光移频器驱动信号必须达到一定的功率要求, 并且信号功率需保持稳定.

1.2 声光移频器驱动信号的频率稳定性对 HLDV 的影响

声光移频器工作时, 输出衍射光的频率随驱动信号的频率发生同步变化. 当声光移频器的驱动信号存在频率漂移时, 为了证明驱动信号频率稳定性对单声光移频器构成的 HLDV<sup>[11]</sup> 的影响, 设定驱动信号的中心频率为  $\omega_{AOFS}$ , 驱动信号的频率漂移量为  $\Delta\omega(t)$ .

图 2 所示为单声光移频器构成的 HLDV 的振动测量实验示意图. 为了标定测振计的探测性能, 定标装置由标准压电陶瓷器件/薄玻璃及信号发生器构成, 信号发生器模拟声源, 压电陶瓷/玻璃模拟待测振动界面. 具体为, 在压电陶瓷表面紧密贴装透明玻璃, 当信号发生器驱动压电陶瓷做简谐振动时, 玻璃与压电陶瓷的振动特性相同, 测量得到的玻璃的振动速度即为压电陶瓷的振动速度.

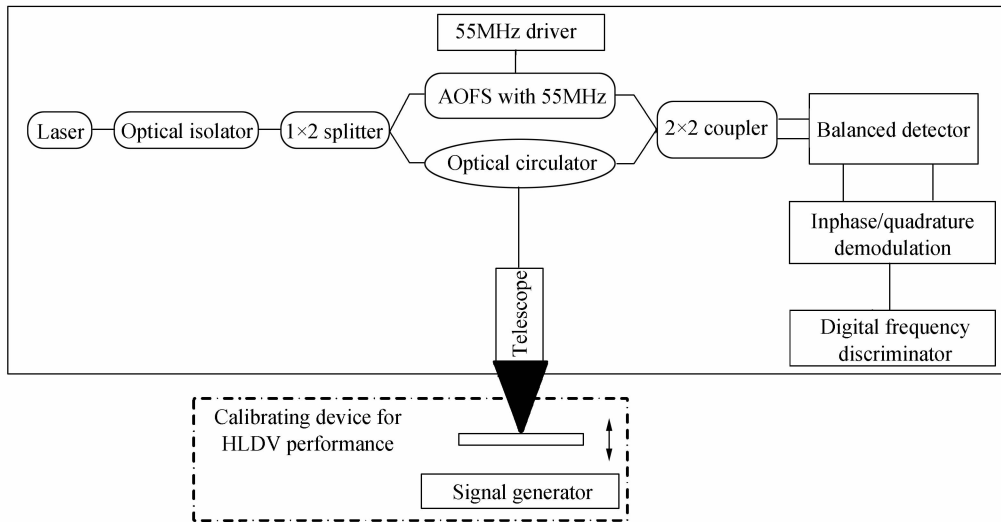


图 2 单声光移频器构成的外差式激光多普勒测振计的振动测量实验装置  
Fig. 2 Schematic of HLDV with one AOFS and calibrating device

振动测量实验中, 激光器输出光信号经光纤分束器分为两路: 一路作为光本振信号并经声光移频器作用得到  $I_{LO}$ , 如式(2)所示; 一路作为探测信号, 经光纤环形器和望远镜发射到定标装置中的振动界面处, 界面反射光再经同一望远镜返回测振计, 且回

波光信号如式(3).

$$I_{LO} = A_{LO} \cos [(\omega_C + \omega_{AOFS})t + \varphi_1] \quad (2)$$

$$I_{sig} = A_{sig} \cos \{[\omega_C + \omega_D(t)]t + \varphi_2\} \quad (3)$$

式中,  $A_{LO}$  表示声光移频器输出光信号幅度,  $A_{sig}$  表示回波信号光幅度,  $\omega_C$  和  $\omega_D(t)$  表示激光频率和界

面振动引入的多普勒频移量,  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  为随机相位。

当光本振信号  $I_{LO}$  和回波光信号  $I_{sig}$  到达  $2 \times 2$  光纤耦合器处, 两者发生光拍频, 经平衡探测器转换输出携带有待测界面振动信息的电信号, 该电信号是中心频率为声光移频器驱动信号频率、调制频率为振动界面引起的多普勒频移量的调频信号。为了提取多普勒频移信息进而获得振动界面的振动特性参量, 在信号提取单元中, 先后通过正交解调电路以及微分鉴频电路提取多普勒频移量<sup>[12]</sup>。具体过程为: 正交解调电路中平衡探测器输出信号经功分器作用等分为两部分, 第一部分与声光移频器的驱动信号执行混频运算后再经  $-3$  dB 带宽为 1 MHz 的低通滤波作用, 得到  $u_{I_1}(t)$ ; 第二部分与经  $90^\circ$  移相后的声光移频器驱动信号执行混频运算再经  $-3$  dB 带宽为 1 MHz 的低通滤波作用, 得到  $u_{Q_1}(t)$ 。在此过程中, 由于声光移频器驱动信号在探测光传播的同时发生频率漂移, 导致参与正交解调的声光移频器驱动信号  $u(t)$  变为式(4)。

$$u(t) = U_{LO} \cos \{ [\omega_{AOFs} + \Delta\omega(t)] t \} \quad (4)$$

进而, 正交解调的输出信号  $u_{I_1}(t)$  和  $u_{Q_1}(t)$  为

$$u_{I_1}(t) = U \cos \{ [\omega_D(t) + \Delta\omega(t)] t + (\varphi_1 - \varphi_2) \} \quad (5)$$

$$u_{Q_1}(t) = U \sin \{ [\omega_D(t) + \Delta\omega(t)] t + (\varphi_1 - \varphi_2) \} \quad (6)$$

最后,  $u_{I_1}(t)$  和  $u_{Q_1}(t)$  经微分鉴频电路解调得到原始的频率信息, 如式(7)。

$$v(t) = \frac{u_{I_1}(t) \times \frac{du_{Q_1}(t)}{dt} - u_{Q_1}(t) \times \frac{du_{I_1}(t)}{dt}}{\omega_D(t) + \Delta\omega(t) + u_{I_1}^2(t) + u_{Q_1}^2(t)} \quad (7)$$

在式(7)中, 当声光移频器驱动信号的频率漂移  $\Delta\omega(t) \ll \omega_D(t)$  时, 声光移频器的频率漂移影响可以忽略不计; 然而, 当两者在数量级上可比拟时, 声光移频器的频率漂移则直接影响多普勒频移量的测量准确度及精度。在标定外差式激光多普勒测振计的最小可分辨振动速度时<sup>[11]</sup>, 声光移频器驱动信号的频率稳定度是决定系统最小可分辨多普勒频移量、最小可分辨振动速度的因素之一。为了进一步提高外差式激光多普勒测振计的最小可探测能力, 需对声光移频器驱动信号的频率稳定特性以及外差式激光多普勒测振计的结构进行优化研究, 降低驱动信号频率漂移的不良影响。

## 2 双声光移频器构成的 HLDV

图 3 是双声光移频器构成的 HLDV 的振动测量实验示意图。激光器输出激光经光纤分束器分为两路: 第一路在经声光移频器 1 上移频后被分为光束 a 和光束 b; 第二路在经声光移频器 2 上移频后被分为光束 c 和光束 d。光束 d 作为探测光经光纤环形器及望远镜作用后聚焦在定标装置中的待测振动界面上, 携带有界面振动信息的回波信号光沿同一路径返回到系统, 并与光束 b 在光纤耦合器 2 中发生拍频, 然后平衡探测器 2 进行光电信号转换, 输出电信号  $u_{sig}$ ; 同时, 光束 a 和光束 c 在光纤耦合器 1 中发生拍频, 经平衡探测器 1 作用, 输出电信号  $u_{LO}$ 。其中, 光束 a、光束 b、光束 c、回波信号光以及平衡探测器输出信号  $u_{sig}$  和  $u_{LO}$  如式(8)。

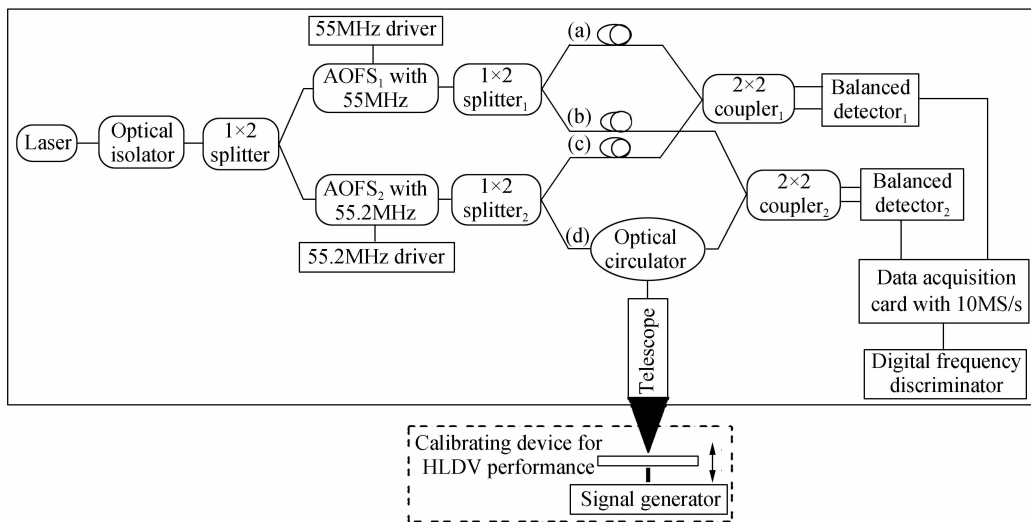


图 3 双声光移频器构成的外差式激光多普勒测振计的振动测量实验装置

Fig. 3 Schematic of Heterodyne Laser Doppler Vibrometry with two acousto-optic frequency shifter and calibrating device

$$I_a = A_a \cos \{ [\omega_C + \omega_{A_1} + \Delta\omega_1(t)] t + \varphi_1 \}$$

$$I_b = A_b \cos \{ [\omega_C + \omega_{A_1} + \Delta\omega_1(t)] t + \varphi_1 \}$$

$$I_c = A_c \cos \{ [\omega_C + \omega_{A_2} + \Delta\omega_2(t)] t + \varphi_2 \}$$

$$I_{dr} = A_{dr} \cos \{ [\omega_C + \omega_{A_2} + \Delta\omega_2(t) +$$

$$\omega_D(t)] t + \varphi_2 \}$$

$$u_{sig} = U_{sig} \cos \{ [\omega_{A_2} - \omega_{A_1} +$$

$$\Delta\omega_2(t) - \Delta\omega_1(t) + \omega_D(t)]t + (\varphi_1 - \varphi_2)\} \\ u_{LO} = U_{LO} \cos \{[\omega_{A_2} - \omega_{A_1} + \\ \Delta\omega_2(t) - \Delta\omega_1(t)]t + (\varphi_1 - \varphi_2)\} \quad (8)$$

式中,  $A_a$ 、 $A_b$ 、 $A_c$ 、 $A_{dr}$ 、 $U_{sig}$  和  $U_{LO}$  表示光束 a、光束 b、光束 c、回波信号光以及平衡探测器输出信号  $u_{sig}$  和  $u_{LO}$  的幅度,  $\omega_{A_1}$ 、 $\omega_{A_2}$  和  $\Delta\omega_1(t)$ 、 $\Delta\omega_2(t)$  表示声光移频器 1 和声光移频器 2 的移频频率和频率漂移量,  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  表示随机相位。

在界面的振动信息提取过程中,所有的算法均是在计算机中实现的. 首先,将  $u_{LO}$  移相  $90^\circ$ ,得到  $u_{LO-90^\circ}$ ;然后,对  $u_{LO}$ 、 $u_{LO-90^\circ}$  和  $u_{sig}$  执行正交解调运算,得到  $u_{I_2}(t)$  和  $u_{Q_2}(t)$  如式(9);最后,  $u_{I_2}(t)$  和  $u_{Q_2}(t)$  经过微分鉴频算法处理得到双声光移频器构成的 HLDV 的输出信号  $v(t)$  如式(10).

$$u_{I_2}(t) = \frac{1}{2} U_{LO} U_{sig} \cos [\omega_D(t)]t \\ u_{Q_2}(t) = \frac{1}{2} U_{LO} U_{sig} \sin [\omega_D(t)]t \\ v(t) = \frac{u_{I_2}(t) \times \frac{du_{Q_2}(t)}{dt} - u_{Q_2}(t) \times \frac{du_{I_2}(t)}{dt}}{u_{I_2}^2(t) + u_{Q_2}^2(t)} = \\ \omega_D(t) \quad (10)$$

从式(10)可知,由于系统光路中采用了双声光移频器,致使参与正交解调的两路信号  $u_{sig}$  和  $u_{LO}$  具有相同的频率漂移量,因此,可以通过振动信息提取算法降低声光移频器驱动信号频率漂移的影响,得到稳定的多普勒频移量. 此外,为了消除 HLDV 中本振光路和探测光路光程差引入的附加相位噪声,在系统光路设计时,系统光学链路采用光纤进行光程补偿。

图 3 所示 HLDV 中,声光移频器 1 和声光移频器 2 标称的移频频率均为 +55 MHz,鉴于系统中数据采集卡的采样速率(10 MS/s · 通道)、声光移频器的工作特性以及测振系统的探测能力,选取声光移频器 1 的驱动信号频率为 55 MHz、幅度为 7.8 V,且该信号借助直接数字频率合成技术实现,声光移频器 2 的驱动信号频率为 55.2 MHz、幅度为 6 V,由信号发生器提供。

## 2.1 55 MHz、7.8 V 声光移频器驱动信号的生成及调理模块设计

根据双声光移频器构成的 HLDV 的工作需要,结合直接数字频率合成技术,采用美国模拟器件 ADI 等公司的相关射频器件将声光移频器 1 驱动信号的生成及调理集成在一块射频电路板上,并借助单片机实现芯片控制,最终生成频率为 55 MHz、幅度为 7.8 V 的声光移频器 1 的驱动信号,并用该

信号驱动测振计开展振动特性测量实验研究。

### 2.1.1 硬件设计

如图 4 所示,声光移频器 1 驱动信号的生成及调理模块主要包括:由 ADI 公司数字频率合成芯片 AD9912 和威克创公司 VCC6 系列晶体振荡器实现信号的生成单元;由 Mini-Circuits 等公司的射频器件构成信号的调理单元。

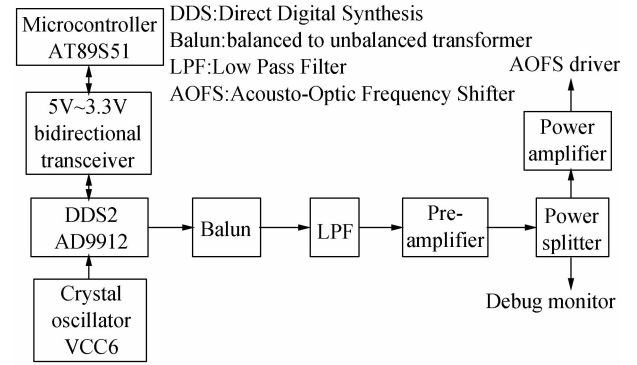


图 4 驱动信号生成及处理模块

Fig. 4 Generation and processing module of the driving signal

实现整个功能模块的关键技术是 DDS 技术. 鉴于 DDS 芯片 AD9912 在 1 GHz 系统时钟的驱动下,可以直接生成频率 400 MHz 以内的模拟正弦信号;其次,芯片内置 48 位频率调谐字和 14 位数模转换器,且具有相位噪声低、无杂散动态范围大、频率分辨率高以及初始相位可控等特点. 因此,本文选取 DDS 芯片 AD9912 作为生成驱动信号的核心器件。

由于 DDS 芯片 AD9912 属于超大规模 CMOS 器件,对时钟信号的质量要求较高,并且 AD9912 的参考时钟输入方式为差分输入形式,因此,选择 VCC6 系列晶体振荡器作为 AD9912 的时钟信号源,提供噪声低、稳定性高、温漂系数小的工作时钟信号,避免时钟噪声在电路中逐级传递。

驱动信号生成单元中,在频率控制字以及时钟信号的作用下,AD9912 以差分方式输出频率为 55 MHz 的正弦信号. 在驱动信号的处理单元中,首先采用非平衡变压器将 AD9912 输出的差分信号转换为单端信号,再由 7 阶椭圆低通滤波器重构正弦波形并对其他频率成分进行有效抑制. 为了方便驱动信号的实时调试,在信号预放大之后,采用功率分器将信号分为两路,一路用作调试监测,另一路经功率放大器作用直接放大至 7.8 V 以满足声光移频器 1 的工作要求。

此外,由于硬件电路中同时存在数字信号和模拟信号,因此,在电路的实际设计中,需对模拟信号和数字信号的分配以及各器件端口的阻抗匹配进行

合理设计,避免数字信号快速的电平变化耦合到信号输出端而影响模拟信号的质量.

### 2.1.2 软件设计

软件设计是通过单片机 AT89S51 对 DDS 芯片 AD9912 的内部寄存器进行编写,包括设置频率控制字和初始相位.所有的寄存器控制都是以四线串行外设接口(Serial Peripheral Interface, SPI)通信方式实现的.

具体设计过程是:首先对 AT89S51 进行初始化设置,然后对 DDS 芯片 AD9912 的控制寄存器进行编程设置,选择 AD9912 的工作模式为单帧方式,并设定 AD9912 选用外部更新时钟.当片选控制(Chip Select, CSB)为低电平时,在串行时钟(Serial Clock, SCLK)的上升沿时刻把携带有 16 位寄存器地址和 8 位频率控制字的数据信息串行移入寄存器.在数据传输结束后,再通过输入/输出命令更新数据指令并使其有效.最后,AD9912 输出与频率控制字对应的信号频率.

### 2.2 HLDV 振动信号测量结果

为了标定比较单声光移频器构成的 HLDV(图 2)和双声光移频器构成的 HLDV(图 3)的本底噪声谱线.首先,保持振动特性定标装置中压电陶瓷静止,然后,两种结构的测振计分别进行振动测量.实验中,激光器输出功率 33 mW,望远镜口径为 30 mm,定标装置距离望远镜 1.5 m.

单声光移频器构成的 HLDV 的本底噪声如图 5 所示,双声光移频器构成的 HLDV 的本底噪声如图 6 所示.图中横坐标表示频率,纵坐标表示各频率分量的功率谱强度.图 5 中,0~1 kHz 频率范围内本底噪声按照指数规律分布,0~10 kHz 频带范围内本底噪声起伏明显,其中,在 2 kHz、4 kHz 和 8 kHz 附近噪声干扰严重.图 6 中,通过光学相干检测链路以及振动信息提取手段的改进,双声光移频器构成的 HLDV 的本底噪声保持在 -96 dB 附近,全频带范围内本底噪声分布较为平坦,且 0~1 kHz 频率范围内,曲线的分布规律与高频部分的曲线分

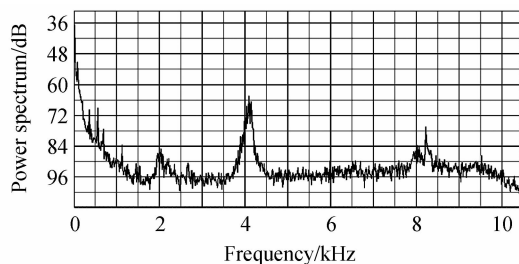


图 5 单声光移频器构成的外差式激光多普勒测振计的本底噪声  
Fig. 5 Noise floor of HLDV with one AOFS

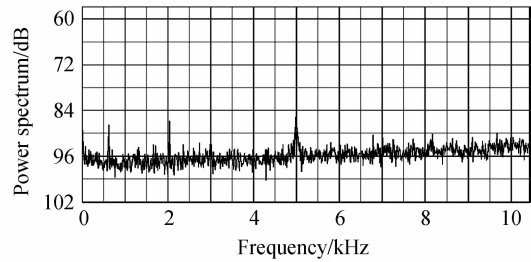


图 6 双声光移频器构成的外差式激光多普勒测振计的本底噪声

Fig. 6 Noise floor of HLDV with two AOFS

布特征一致,较图 5 有明显改善,因此,双声光移频器构成的测振计的低频振动探测能力得到显著提高.实验中,由于声光移频器 2 的驱动信号频率为 55.2 MHz,此时,声光移频器 2 的工作特性没有达到标称的理想状态.因此,图 6 所示本底噪声谱线在 800 Hz、2 kHz 和 5 kHz 处出现干扰频率成分,在满足测振系统中数据采集卡采样率的前提下,可以通过调整声光移频器 2 的驱动信号频率降低上述干扰频率对本底噪声分布特性的影响.

在明确双声光移频器构成的 HLDV 的本底噪声分布特性的基础上,为了进一步判断该测振计在不同频段处的声信号探测能力,将定标装置中压电陶瓷的驱动信号设定为频率从 2 kHz 到 7 kHz 连续变化(频率间隔为 1 kHz)、幅度 100 mV 的正弦信号,且各频率信号的时间长度为 1.5 s.图 7 表示实验测量得到的输出信号时频图,横坐标表示测量时间,纵坐标表示信号频率.图中的黑色背景代表系统本底噪声,白色线条代表测振计输出的信号分布强度及频率,白色线条相对黑色背景越清晰表明该频段处的信噪比越高.从图 7 中可知,配合使用驱动信号生成及处理模块产生的 55 MHz、7.8 V 的驱动信号,双声光移频器构成的外差式激光多普勒测振系统的输出信号频率及时间长度分布规律与定标装置中压电陶瓷驱动信号的特征一致,证明该测振计能够实时准确地获取界面的振动信息,且分布均匀的背景表明系统的本底噪声在测量频带范围内分布特性一致.其次,图 7 中各频率分量的亮度基本一

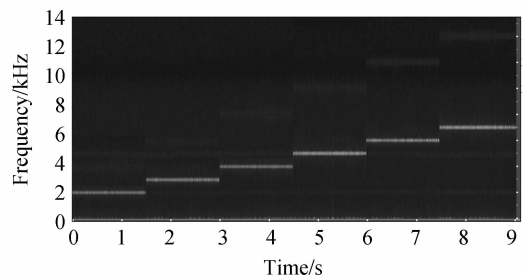


图 7 双声光移频器构成的外差式激光多普勒测振计输出信号时频图  
Fig. 7 Time-frequency map of the HLDV with two AOFS

致,表明系统对各频率信号具有相同的响应特征,各频率信号的信噪比一致.并且,在0~9 s测量时段内,2 kHz和5 kHz处连续分布的频率成分即为图6中的2 kHz和5 kHz干扰频率.由于上述2 kHz和5 kHz干扰频率与待测信号频率(2 kHz和5 kHz)重叠.因此,为了分辨压电陶瓷在以上两个频率点的振动特性,故将压电陶瓷驱动信号幅度设定在100 mV,但是,过强的驱动信号导致测振计输出信号时频图中出现了频率的倍频分量.

### 3 结论

本文从理论计算和实验验证两个角度详细分析了声光移频器驱动信号功率及频率漂移对HLDV的影响规律.为了降低驱动信号频率漂移对HLDV探测性能的影响,提出双声光移频器构成的HLDV结构,并基于DDS技术完成该测振计工作所需的声光移频器驱动信号的生成及处理模块的软硬件设计.在此基础上,对双声光移频器构成的HLDV进行了实验研究,并系统比较了双声光移频器和单声光移频器构成的HLDV的本底噪音差异.结果表明,双声光移频器构成的HLDV能够准确获取2 kHz~7 kHz的振动频率信息,10 kHz频带范围内系统本底噪音谱线的起伏程度得到明显抑制,且1 kHz以下频段的本底噪音曲线呈平坦分布,平坦的低频噪音谱线为实现低频振动信息的非接触探测和提取提供了新的研究方向.

#### 参考文献

- [1] ANTONELLIA L, BLACKMON F. Experimental demonstration of remote, passive acousto-optic sensing[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, **116**(6): 3393-3403.
- [2] BLACKMON F, ANTONELLIA L. Experimental detection and reception performance for uplink underwater acoustic communication using a remote, in-air acousto-optic sensor[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, **31**(1): 179-187.
- [3] HE Yan, SHANG Jian-hua, LIU Dan, et al. Heterodyne laser doppler vibrometer for underwater acousto-optic communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(1): 189-192.
- 贺岩, 尚建华, 刘丹, 等. 用于水下声光通信的外差式激光多普勒测振计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 189-192.
- [4] ZHOU Jian, LONG Xing-wu. Application of different laser Doppler velocimeter in solid velocity measurement[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(2): 334-337.
- 周健, 龙兴武. 差动激光多普勒测速仪在固体速度测量中的应用[J]. *应用光学*, 2009, **30**(2): 334-337.
- [5] ZHANG Xiao-lin, TANG Wen-yan, SUN He-yi. Laser interferometry of underwater acoustic signals[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 809-815.
- 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.
- [6] ZHAO Yang, ZHOU Ting, LI Da-cheng. Influence of characteristics of an AOM on the measurement accuracy of a heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1368-1374.
- 赵洋, 周挺, 李达成. 外差干涉仪中声光调制器特性对测量准确度的影响[J]. *光学学报*, 1999, **19**(10): 1368-1374.
- [7] MYCHKOVSKY A G, CHANG N A, CECCIO S L. Bragg cell laser intensity modulation: effect on laser doppler velocimetry measurements[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(18): 3468-3474.
- [8] HUANG Hua, ZHOU Jian. Scattered light in laser doppler velocimeter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(1): 151-155.
- 黄华, 周健. 激光多普勒测速仪中散射光特性的研究[J]. *应用光学*, 2010, **31**(1): 151-155.
- [9] SAPIRIEL J. Acousto-optics[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1979: 57.
- [10] CHEN Hai-bo, CHEN Fang, SHE Wei-long. The design of acousto-optics modulator for both phase modulation and amplitude modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 166-169.
- 陈海波, 陈芳, 余卫龙. 相位、振幅调制两用声光调制器设计[J]. *光子学报*, 2003, **32**(2): 166-169.
- [11] SHANG Jian-hua, ZHAO Shu-guang, HE Yan, et al. Experimental study on minimum resolvable velocity for heterodyne laser doppler vibrometry[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(8): 081201-081203.
- [12] SHANG Jian-hua, HE Yan, ZANG Hua-guo, et al. New frequency discriminating circuit of laser doppler vibration signal[J]. *Chinese Journal Lasers*, 2008, **35**(1): 92-96.
- 尚建华, 贺岩, 臧华国, 等. 新型声光通信激光多普勒信号的鉴频电路[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 92-96.

## Heterodyne Laser Doppler Vibrometer Based on Double Acousto-optic Frequency Shifters

SHANG Jian-hua<sup>1</sup>, REN Li-hong<sup>1</sup>, XU Hai-qin<sup>1</sup>, ZHAO Shu-guang<sup>1</sup>, HE Yan<sup>2</sup>

(1 College of Information Science & Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

(2 Key laboratory Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** The influence on the measured vibration signal caused by the frequency-stability and signal power of driver signal to acousto-optic frequency shifter (AOFS) in the high-precision heterodyne laser doppler vibrometry (HLDV) with one AOFSs was analyzed. In order to reduce the frequency drifting and the phase noise of the driver signal, the HLDV composed with two AOFSs was proposed. And based on the direct digital frequency synthesis (DDS) technology, the design of the driving signal generation unit has been completed with AD9912 which has the characteristic of adjustable initial-phase and low phase noise. The vibration-measuring experiments performed with HLDV consists of two AOFS shows that the designed generation unit is able to drive the AOFS. Meantime, compared with the HLDV with one AOFS, the noise floor from 0 to 10 kHz of the HLDV with two AOFS is flat and the noise distribution below 1 kHz has been depressed greatly.

**Key words:** Heterodyne Laser Doppler Vibrometry (HLDV); Acousto-optic Frequency Shifter (AOFS); Direct Digital Frequency Synthesis (DDS)