

文章编号: 0258-7025(2007)05-0703-04

激光多普勒振动计用于水下声光通信

贺 岩¹, 王文奎¹, 夏文兵¹, 臧华国¹, 崔雪梅¹, 陈卫标¹, 马 力²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院声学研究所, 北京 100080)

摘要 介绍了激光多普勒振动计(LDV)用于水下声光通信的应用背景,阐述了激光多普勒振动计的工作原理和两种相干检测方式。采用零差的相干探测方式,设计并实现了一套光纤结构的激光多普勒振动计。为了证明系统能够应用于水下声光通信,进行了对水下声源发出的声波频率和强度的探测实验。通过对实验数据的分析得出:第一,系统能够检测出水下声源发出的声波频率,对7 kHz附近的10个声波频率的测量标准偏差小于8 Hz;第二,系统探测信号强度与水下声源发声的声压级成指数关系,对于水下目标通信所用的3.5 kHz和7 kHz声波频段的最小探测能力分别达到146.2 dB和150.8 dB声压级。

关键词 激光技术;激光多普勒振动计;声光通信;零差探测

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Laser Doppler Vibrometer for Acousto-Optic Communication

HE Yan¹, WANG Wen-kui¹, XIA Wen-bing¹, ZANG Hua-guo¹,
CUI Xue-mei¹, CHEN Wei-biao¹, MA Li²

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract This paper introduces the application background for developing an laser Doppler vibrometer (LDV) for underwater acoustic communication and expounds the principle of laser Doppler vibrometer and two coherent detection methods. Using the way of homodyne coherent detection, a fiber laser Doppler vibrometer is designed and completed. To prove the system can be used in underwater acousto-optic communications, with this system, the acoustic frequency and intensity of underwater sound source are detected. Through the analysis of experimental data, two conclusions are gotten: first, the system is able to detect the acoustic frequency of underwater sound source, the standard deviation of measuring ten acoustic frequencies near the frequency of 7 kHz is less than 8 Hz; second, the signal intensity of system detection is an exponential function of acoustic press level of underwater sound source. For the acoustic band of 3.5 kHz and 7 kHz used in underwater communications, the smallest sound press level of detection reached 146.2 dB and 150.8 dB respectively.

Key words laser technique; laser Doppler vibrometer; acousto-optic communication; homodyne detection

1 引言

水下目标的无线通信主要使用声波作为通信手段,由于水气交界面的限制,实现水下目标和水上平台通信的传统方法需要将水上平台的传感器侵入水中,从而限制通信的灵活性。而单纯采用激光直接实现对水下目标的通信方法由于激光对水体穿透能力有限,限制了其应用的范围^[1]。美国海军水下战争中心的 F. Blackmon 等^[2,3]提出采用声光通信方

法实现水下目标对水上平台的上行通信,在水气交接面利用激光多普勒振动计(LDV)检测水下声波引起的水面振动,从而获取水下目标发出的信息。激光多普勒振动计是一种非接触式振动测量仪器,它具有非接触测量、精度高、测点小、动态响应快等优点,在航空航天、机械等众多领域有着重要的应用价值。传统的激光多普勒振动计主要以 He-Ne 和 CO₂ 气体激光器为光源^[4~6],系统采用的干涉仪为

收稿日期:2006-04-05;收到修改稿日期:2007-01-19

作者简介:贺 岩(1977—),男,河南开封人,助理研究员,硕士,主要从事激光雷达和激光相干探测研究。

E-mail: heyang@mail.siom.ac.cn

镜片结构,对光学器件的表面质量和光路校准要求很高。随着光纤通信的发展,一系列光纤器件逐渐成熟,采用光纤结构大大降低了对光学表面质量和光路校准的要求,简化了光学结构,进而提高了系统的稳定性。本文设计并实现了一套光纤结构的激光多普勒振动计。

2 工作原理

激光多普勒振动计采用多普勒相干测速的工作原理^[7],系统发出的相干激光束照射到被测物体表面,表面振动使得物体表面的散射光(信号光)发生多普勒频移,该频移 Δf_0 和物体表面振动速度 V 的关系为

$$\Delta f = f_0 \frac{1 - \frac{V \cdot e_0}{c}}{\sqrt{1 - \left(\frac{V \cdot e_0}{c}\right)^2}}, \quad (1)$$

式中 f_0 为激光频率, c 为介质中光速, e_0 为激光入射向量。当 $V \cdot e_0 \ll c$ 时,多普勒频移和物体振动速度呈线性关系

$$\Delta f = \frac{2V \cdot \cos\theta}{\lambda}, \quad (2)$$

式中 θ 为运动方向和观察方向的夹角, λ 为激光波长。可以通过相干检测的方法测量多普勒频移,从而获得物体振动速度。

相干检测从方式上分为零差检测和外差检测,零差检测是将频率 f_s 的激光多普勒信号与频率 f_r 的本振激光进行混频,平衡探测器消除直流漂移,输出差频 Δf_D , 鉴频后获得多普勒频移,原理图如图 1 所示。

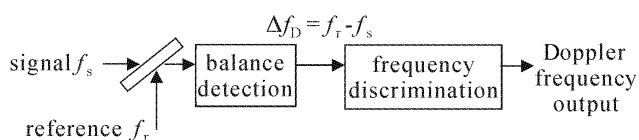


图 1 零差检测原理图

Fig. 1 Theory of homodyne technique

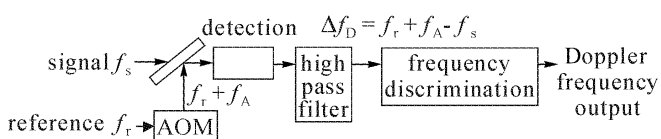


图 2 外差检测原理图

Fig. 2 Theory of heterodyne technique

外差检测是将频率 f_s 的激光多普勒信号与经过声光调制器(AOM)的频率 $f_r + f_A$ 的本振激光进

行混频,探测器输出差频 Δf_D , 经过高通滤波消除直流漂移,鉴频后获得多普勒频移,原理图如图 2 所示。

对于做简谐振动的物体表面,表面的速度随振动频率做周期性变化,对检测的波形做频率解调,然后做频谱分析,即可获得物体表面的振动频率。

3 系统设计

系统采取零差工作模式,旨在验证水下声光通信的可行性,系统结构如图 3 所示。主要模块包括单纵模光纤激光器、三端光纤环形器、望远镜、光纤滤波器和光电探测器。激光器采用分布反馈光纤激光器,激光波长为 1550 nm,线宽小于 10 kHz,输出功率为 100 mW。输出激光进入光纤环形器的 1 端口,光纤隔离器隔离度大于 32 dB,有效阻止光纤接口的反射光回到激光器而对激光器造成损伤。由 2 端口出射的激光,在出射光纤端面分为反射光和透射光,端面反射光作为相干检测的参考光,透射光经成像透镜聚焦到被测水表面,水表面随声波频率作受迫振动,水表面反射光的相位随水表的振动而产生周期性变化,即携带了表面振动的频率信息,水表面反射光由同一个透镜接收到光纤环形器的 2 端口,作为相干检测的信号光。信号光和参考光在接收的单模光纤内相干,相干光从端口 3 出射,经过光纤滤波器滤波后照射到光电探测器,直接检测相干信号。检测到的相干信号由高精度数据采集卡记录,解调后经过快速傅里叶变换(FFT)分析获得的振动频率。

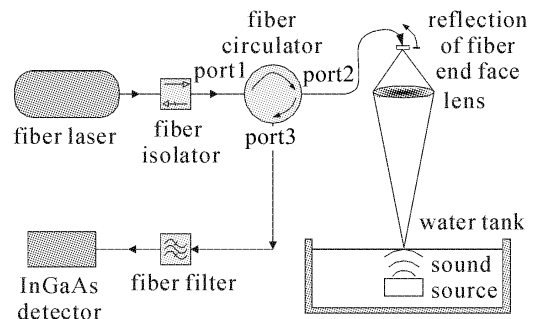


图 3 激光多普勒振动计的组成

Fig. 3 Structure of laser Doppler vibrometer

由于选用激光通信波长,因此除发射/接收透镜外,光学部分全部采用光纤通信领域使用的成熟器件,光路由带 FC/APC 型接头的光纤跳线构成,安装灵活,光学结构简单可靠。系统的主要器件技术指标如表 1 所示。

表 1 系统主要部件的性能指标

Table 1 Specifications of system components

Device	Parameter	Value
Fiber laser	Wavelength /nm	1550
	Output power /mW	100
	Line width /kHz	<10
Fiber isolator	Insertion loss /dB	<0.5
	Separation /dB	>32
Fiber circulator	Insertion loss /dB	<0.8
	Separation /dB	60
Fiber filter	Band width /nm	0.45
	Insertion loss /dB	<0.6
InGaAs detector	Response (1550 nm) /(A/W)	0.9
	Band width /MHz	4
A/D	Sample rate /MHz	10
	Resolution /Bit	16

4 实验结果

按照图 3 的实验装置,在水槽水面下吊装声波发生器,发生的声波引起水表面的振动,激光振动计将激光聚焦到水表面,探测水表面振动导致的相位变化。实验目的是证明激光多普勒方法对水下声源的发声频率和强度测量的一致性,从而验证激光多普勒振动计应用于水下声光通信的可行性。

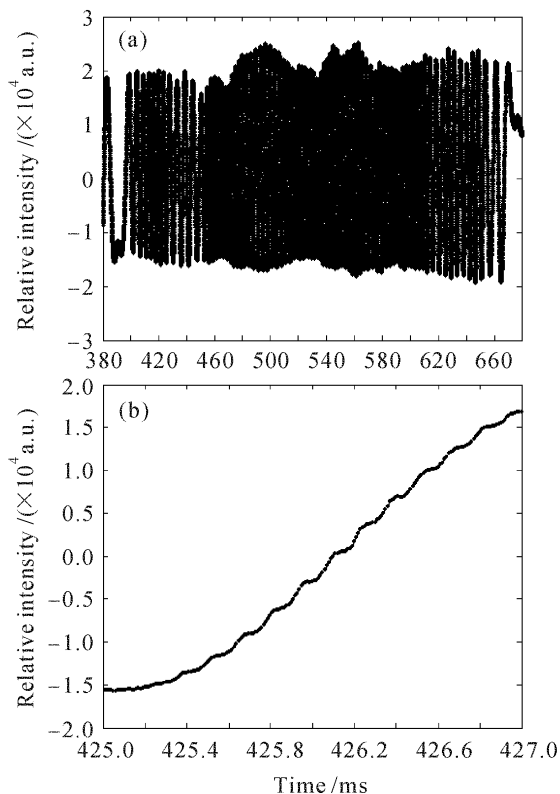


图 4 输出强度的时间序列波形

Fig. 4 Time series waveform of output intensity
(a) 380~680 ms; (b) 425~427 ms

系统采用零差工作方式,没有采用通常的偏振检测方法来获得正交分量的相干信号,从而鉴别运动方向,而是依靠水槽中水面的自由起伏产生的运动速度,达到外差的效果。图 4(a)是当水下声波频率为 7 kHz 时。水面运动的相干检测波形。水面的运动从左到右完成速度由慢到快再到慢的变化过程,时间约为 180 ms,水面起伏的频率近似 2.8 Hz,该频率远低于水下声源发射的声波频率,因此,可以认为在短时间内,水面起伏的速度方向和大小恒定。从中选出水面起伏运动速度恒定的短时间测量数据来分析,数据如图 4(b)所示,图中长时间尺度、单方向的相位变化是由水面起伏引起的,短时间尺度的高频相位变化是由声波引起的,综合的结果是相位朝着一个方向变化,可以说明,水面起伏的瞬时速度大于声波引起的水表面振动速度,因此测量到的水面运动方向是一致的,没有运动方向的混叠。图 5 为该段数据频率解调并滤波后的波形,频率为 7 kHz。

为了检测测量频率和水下声源频率的一致性,进行了激光多普勒振动计测量振动频率与声源原始频率的比较实验。声波发生器产生频率范围为 6.5

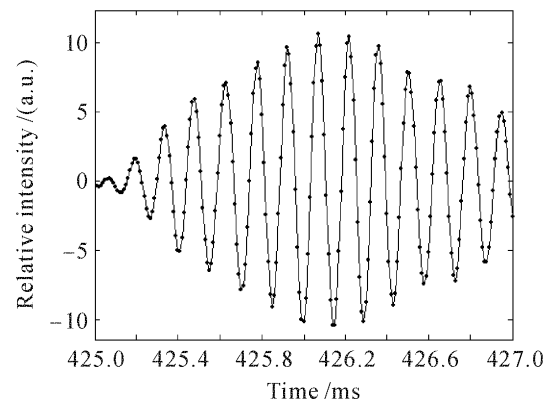


图 5 水面振动速度的时间序列波形

Fig. 5 Time series waveform of water surface vibration velocity

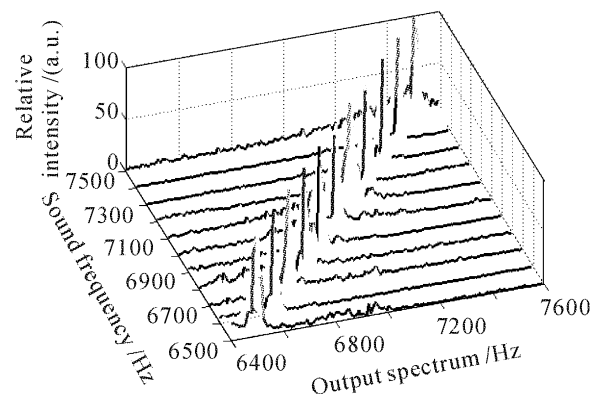


图 6 激光振动计获得不同声源频率的谱特征

Fig. 6 Output spectrum of laser vibrometer versus frequency of sound source

~7.5 kHz, 声波频率间隔100 Hz, 激光多普勒振动计测量到的频谱如图6所示。图6纵坐标为声波振源频率, 横坐标为对应单个振源频率, 激光多普勒振动计测量到的频谱。可以看出激光多普勒振动计测量频谱中的最高频率分量与声源频率一致。

然后, 对于上述每个声源频率, 用激光多普勒振动计进行5组测量, 测量到的频率标准偏差如图7所示。图7横坐标为激光声波振源频率, 纵坐标为激光振动计测量到的频率标准偏差, 其中10个频率

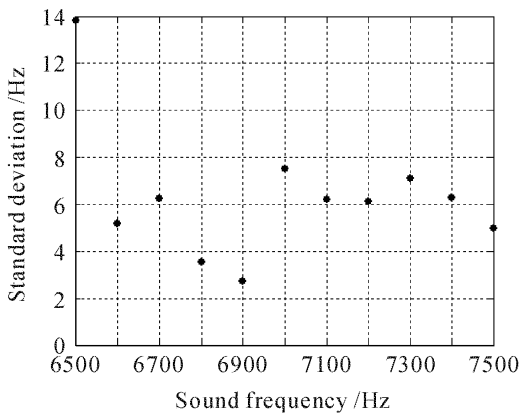


图7 激光振动计对不同声源频率的测量标准偏差

Fig. 7 Standard deviation of laser vibrometer versus frequency of sound source

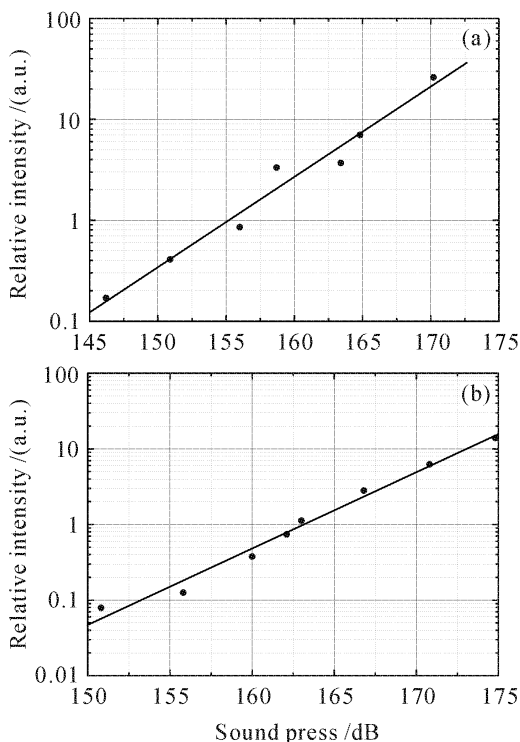


图8 激光振动计对3.5 kHz(a)和7 kHz(b)声源的测量强度随声压的变化

Fig. 8 Output intensity of laser vibrometer versus sound pressure at 3.5 kHz (a) and 7 kHz (b)

的测量值标准偏差小于8 Hz, 因此, 可以通过激光多普勒振动计测量来获得水下声源的频率信息。

最后, 针对声光通信所采用的声波频段3.5 kHz和7 kHz, 在距离水下声源1.7 m处, 测量激光多普勒振动计的探测灵敏度。激光多普勒振动计对于3.5 kHz和7 kHz声波引起的水面振动频率测量强度如图8所示。图8(a)和(b)横坐标为激光声波振源声压级, 纵坐标为激光多普勒振动计测量频率的相对强度, 圆形数据点为在不同声源声压级下激光多普勒振动计测量到的声频率振动强度, 直线为数据点的拟合, 表明随着声源声压级的降低, 探测的频率强度成指数递减。对于3.5 kHz声源, 最小探测声压级为146.2 dB, 对于7 kHz声源, 最小探测声压级为150.8 dB。

5 结 论

实验表明, 应用激光多普勒振动计测量水表面的振动频谱, 能够探测到水下声源发出的声波频率, 对7 kHz附近的10个声波频率的测量标准偏差小于8 Hz。探测信号强度与水下声源发声的声压级成指数关系, 在水下目标通信所用的3.5 kHz和7 kHz声波频段, 对水下1.7 m处声源的最小探测能力分别达到146.2 dB和150.8 dB声压级。

参 考 文 献

- Liu Jintao, Chen Weibiao. Feasibility study of laser communications from satellite to submerged platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1441~1446
刘金涛, 陈卫标. 星载激光对水下目标通信可行性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1441~1446
- F. Blackmon, L. Antonelli, L. Estes *et al.*. Experimental investigation of underwater to in-air communications [C]. UDT Europe 2002 Conference, LaSpezia, Italy, 2002, 17~20
- F. Blackmon, L. Antonelli. Acousto-optic comm links underwater and in-air platforms [J]. *Sea Technology*, 2004, **6**: 58~66
- G. D. Hickman, Y. L. Hsu, M. S. Lee *et al.*. Measurement of liquid surface acoustic wave amplitudes using He-Ne laser homodyne techniques [C]. *SPIE*, 1988, **925**:263~267
- Lijie Qiao, Xiping Cai, Lili An *et al.*. Technique of CO₂ laser Doppler vibrometer [C]. *SPIE*, 1999, **3862**:586~590
- Xiao Linzhuozhi. Laser Doppler vibrometer [J]. *Foreign Meterage*, 1992, (2):28~30
小林卓之. 激光多普勒振动计[J]. *国外计量*, 1992, (2):28~30
- Shen Xiong. Technology and Application of Laser Doppler Veolcimeter [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
沈 雄. 激光多普勒测速技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004