

文章编号: 0258-7025(2009)01-0189-04

用于水下声光通信的外差式激光多普勒振动计

贺岩¹ 尚建华¹ 刘丹¹ 贾宁² 臧华国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 基于外差激光多普勒原理, 设计并实现了一套光纤结构的外差式激光多普勒振动计(LDV)。在消声水池, 对该系统的探测灵敏度、上行声光通信速率以及水面波浪的影响进行了测试实验。实验结果表明, 系统最小探测声压达 105.6 dB/ μ Pa; 在平静水面, 无误码情况下, 声光通信速率可达 5 kbit/s; 在有小波浪的水面, 导致部分探测信号丢失, 采用扩频调制通信方式, 无误码情况下, 声光通信速率可达 30 bit/s。

关键词 测量; 激光多普勒振动计; 声光通信; 外差探测

中图分类号 TN958.98; TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0189

Heterodyne Laser Doppler Vibrometer for Underwater Acousto-Optic Communication

He Yan¹ Shang Jianhua¹ Liu Dan¹ Jia Ning²
Zang Huaguo¹ Chen Weibiao¹ Ma Li²

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

Abstract Base on the heterodyne laser Doppler theory, a heterodyne laser Doppler vibrometer(LDV) with fiber structure was designed and implemented. The sensitivity and communication rate of the system, and the influence from water surface wave were tested in anechoic tank. The experimental results show the smallest detectable sound press of 105.6 dB/ μ Pa. On hydrostatic water surface, the acousto-optic communication rate reaches 5 kbit/s without error; some signal is Dropped on hydrodynamic water surface, but using the spread-spectrum modulation, the acousto-optic communication rate reaches 30 bit/s without error.

Key words measurement; laser Doppler vibrometer; acousto-optic communication; heterodyne detection

1 引言

声波是水上平台与水下目标进行无线通信的主要手段。因水气交界面的限制, 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^[1,2], 由于激光对水体穿透能力有限, 限制了其应用的范围。F. Blackmon 等^[3~5]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, 在水气交接面利用商用的激光多普勒振动计(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, 检测水面声波的灵敏度达 120 dB/ μ Pa。商用的 LDV 主要以 He-Ne 气体激光器为光源^[6,7], 激光功率只有几个毫瓦, 作用距离很近; 632 nm 波长的激光对水体具有一定的穿透能力, 水体的散射会降低水面振动测量的灵敏度, 因此商用的 LDV 难以应用于实际通信。为了能够提高通信的作用距离, 必须提高振动探测的灵敏度和激光振动计的作用距离。本文建立了一套用于水下声光通信的基于光纤结构的激光多普勒振动计。

收稿日期: 2008-01-09; 收到修改稿日期: 2008-04-30

作者简介: 贺岩(1977-), 男, 河南人, 博士研究生, 主要从事激光雷达和激光相干探测方面的研究。

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

导师简介: 陈卫标(1969-), 男, 上海人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光器和激光雷达技术方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

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^[8],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 Δf

$$\Delta f = \frac{2V \cos \theta}{\lambda}, \quad (1)$$

式中, V 为物体表面振动速度, λ 为激光波长, θ 为运动方向和观察方向的夹角。可通过相干检测的方法测量物体表面振动造成的多普勒频移,从而获得物体振动速度。

文献^[9]设计并实现了一套光纤结构的激光多普勒振动计,但只有在水面起伏的瞬时速度大于声波引起的水表面振动速度时能够还原水面振动的波形,导致只能在频谱上看到水面振动的频率,而无法还原水面的振动波形。针对这种情况,本文的设计改用外差工作方式,能够还原水面振动的波形,并实现水下目标和水上平台的上行声光通信。

外差检测是将频率 $f_L + f_D$ (f_L 为激光频率, f_D 为多普勒频率)的激光多普勒信号与经过声光调制器(AOM)的频率 $f_L + f_A$ (f_A 为外差频率)的本振激光进行相干,经过带通滤波消除直流和低频项,输出频率为 $f_A - f_D$ 的差频信号,该信号是以 f_A 为中频,受多普勒频率 f_D 调制的调频信号,鉴频后获得多普勒频移,即物体表面运动的速度,原理图如图 1 所示。

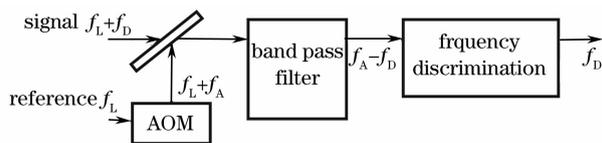


图 1 外差检测原理图

Fig. 1 Principle scheme of heterodyne detection

3 系统设计

如图 2 所示,系统采用收发同轴设计,激光器采用分布反馈光纤激光器,出射人眼安全的、窄线宽 1550 nm 激光,最大输出功率为 100 mW。输出激光入射到一个 1×2 光纤分束器,其中一路分出 1 mW 激光经过声光移频器移频 55 MHz 后作为本振光,55 MHz 的驱动信号由单频信号发生器产生,经放大后加到声光移频器上。分束器的另一路输出接到光纤环形器,由光纤环形器经望远镜聚焦于水表面,水面反射的信号光由相同的望远镜和光纤环形器接收。由于激光发射和接收采用同一光路,不

仅光路简单,易于调节,而且光学耦合效率高。

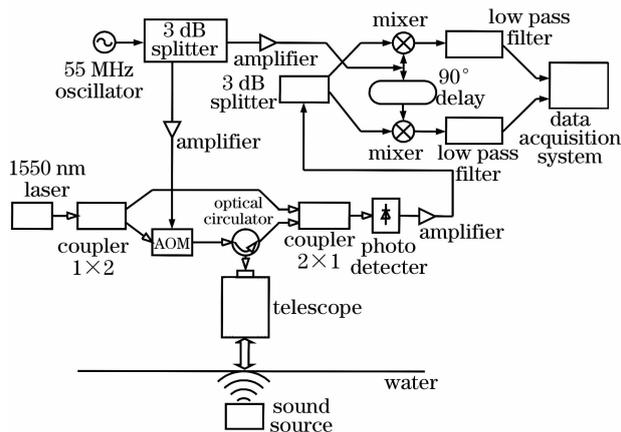


图 2 激光多普勒振动计的组成

Fig. 2 Basic structure of LDV

光纤环形器输出的回波信号和经过移频的本振光进入 2×1 光纤耦合器,在输出端进行相干,由光电探测器检测相干信号。从光电探测器输出的电信号是调制到 55 MHz 载频上的振动引起的频移信号,再经过正交解调处理后,获得两路基频的正交信号,低通滤波后将两路正交信号数字化,经过数字频率解调获得水面振动速度。对解调的水面振动速度作后期的信号处理即可获得水面振动的频率和幅度等信息。

表 1 系统主要部件的性能指标

Table 1 Specification of system's components

Device	Parameter	Value
Fiber laser	Wavelength	1550 nm
	Output power	100 mW
	Linewidth	<10 kHz
Telescope	Diameter	30 mm
	Focus	100 mm
Fiber circulator	Insertion loss	<0.8 dB
	Separation	60 dB
AOM	Frequency	55 MHz
	Insertion loss	<3 dB
InGaAs detector	Response(1550 nm)	0.9 A/W
	Bandwidth	150 MHz
A/D converter	Sampling rate	250 kHz
	Resolution	16 bit

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。

4 实验结果

实验方案如图 3 所示,在消声水池水面下吊装换能器,换能器距离水面 2 m,激光振动计测量点距离换能器吊装平面 0.42 m;用于定标的水听器吊在水面下 0.1 m,距离换能器吊装平面的距离 S 和 L 近似相等,可以用水听器测量的信号作为激光振动计测量信号的标定。

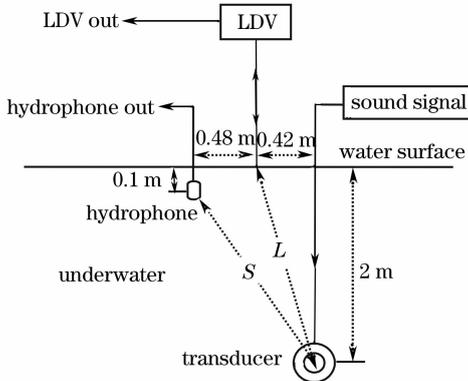


图 3 激光多普勒振动计实验方案

Fig. 3 Experimental scheme of LDV

实验的声信号经过放大后驱动换能器发出声波,声波传输到水面后引起水表面的振动,其频率和相位与声波一致。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,输出水表面的振动速度,还原声波波形。图 4 是激光振动计探测到的频率为 6 kHz 的声波引起的水面振动波形,其频率和相位与声波一致。实验目的是检测激光振动计的灵敏度、频率响应和通信的速率。

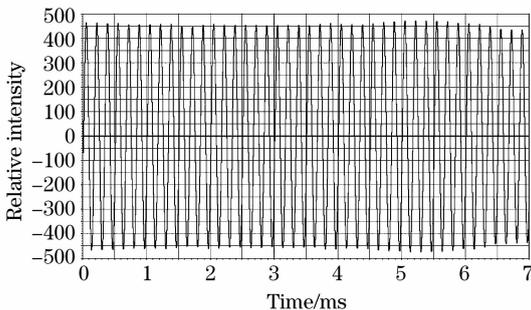


图 4 输出强度的时间序列波形

Fig. 4 Time series waveform of output intensity

4.1 灵敏度检测

针对声光通信所采用的声波频段 6 kHz,测量 LDV 的探测灵敏度。发射时间长度为 1 s 的单频信号,逐渐减小发射信号幅度,直至接收信号不能被激光测振系统检测到,以此时信号的强度作为系统的灵敏度。图 5 为激光振动计测量的信号时频图,

从左到右,声信号强度依次递减。

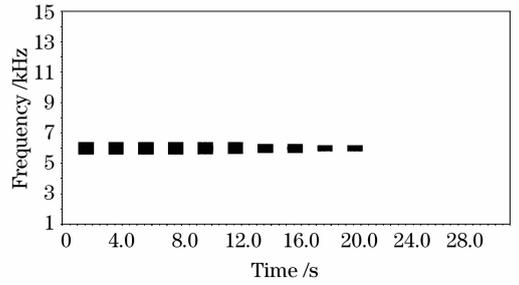


图 5 6 kHz 信号时频图

Fig. 5 Spectrogram of 6kHz signal

用于标定水听器灵敏度的定义为

$$H_p = 20 \lg \frac{\nu_h}{\nu_0} = -205.6 \text{ dB}, \quad (2)$$

式中 ν_h 为水听器的灵敏度, ν_0 为参考级, $\nu_0 = 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ 。LDV 输出最弱信号时,水听器的接收信号电压 $V = 0.01 \text{ mV}$,由此得到水听器处的声压为 $P = V/\nu_h = 0.19 \text{ Pa}$ 。

由于换能器与水听器的距离 S 和换能器与激光照射点之间的距离 L 近似相等,根据球面波衰减理论,激光振动计测量处的声压也约为 0.19 Pa ,即 $105.6 \text{ dB}/\mu\text{Pa}$,因此可认为激光振动计对水面声波的最小检测声压为 $105.6 \text{ dB}/\mu\text{Pa}$ 。

4.2 通信的速率

在水面平静的情况下,水下换能器发射正交相移键控(QPSK)调制通信码,通过 LDV 测量声波引起的水面振动信号、软件还原通信码、检测通信的一致性和速率。图 6 为 LDV 测量的 QPSK 调制通信信号的时频波形,可见波形连续无断点,没有误码,通信速率达 4 kbit/s 。同样情况下,采用 8 相移键控(8PSK)调制通信码,通信速率可达 5.6 kbit/s ,没有误码。

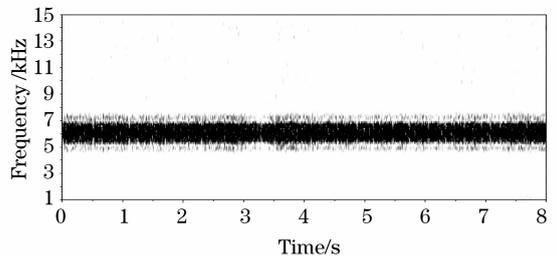


图 6 激光多普勒振动计输出的时频图

Fig. 6 Spectrogram of LDV output

在水面有浪的情况下,波浪会造成激光接收信号的角度偏移,波浪造成的激光角度偏移分别在 $\pm 1^\circ$ 和 $\pm 2.5^\circ$ 范围内时,通信信号的时频波形如图 7(a), (b) 所示。由图 7(a) 可见,通信信号的丢失率达 40%,

采用 QPSK 扩频调制通信方式,在无误码情况下,通信速率可达 30 bit/s。由图 7(b)可见,通信信号的丢失率达 90%,无法实现连续通信。因此当水面波浪较大时,通信信号丢失情况严重,在实际应用中可采用多路 LDV 同步工作方式,减少总体的通信信号丢失率,保障通信信号的连续性。

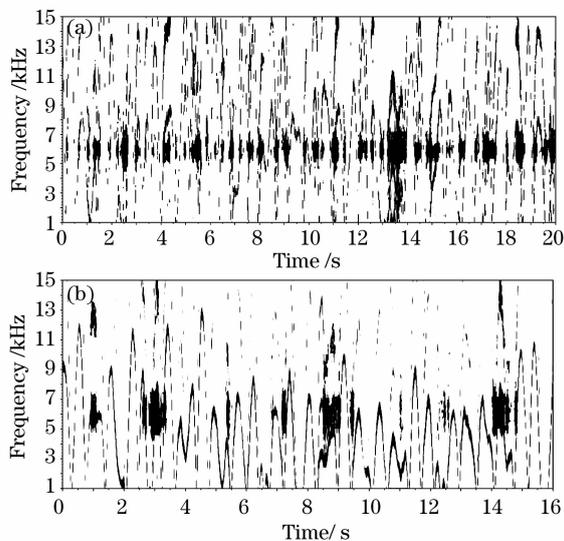


图 7 激光角度偏移 1° (a), 2.5° (b)时的信号时频图

Fig. 7 Spectrograms of LDV output when laser deviation angle caused by water surface wave is about 1° (a) and 2.5° (b)

5 结 论

设计并实现了一套光纤结构的外差式激光多普勒测速计。实验表明,激光多普勒测速计对水面声波的最小灵敏度达 $105.6 \text{ dB}/\mu\text{Pa}$;在静态水面下,通信连续无断点,通信速率可达 5.6 kbit/s ;在动态

水面下,信号丢失率与水面波动角度成正比,当水面波动导致激光偏移 $\pm 1^\circ$ 时,采用 QPSK 扩频调制方式能够保证 30 bit/s 的无误码通信速率。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1166~1172
梁波,朱海,陈卫标.大气到海洋激光通信信道仿真[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1166~1172
- 3 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
- 4 F. Blackmon, L. Antonelli. Acousto-optic comm links underwater and in-air platforms[J]. *Sea Technology*, 2004, **6**:58~66
- 5 Lynn Antonelli, Fletcher Blackmon. Experimental demonstration of remote, passive acousto-optic sensing [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, **116**(6):3393~3403
- 6 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
- 7 Xiao Linhuozhi. Laser Doppler vibrometer [J]. *Foreign Meterage*, 1992, (2):28~30
小林卓之,激光多普勒测速计[J]. *国外计量*, 1992, (2):28~30
- 8 Shen Xiong. Technology and Application of Laser Doppler Velocimeter[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
- 9 He Yan, Wang Wenkui, Xia Wenbing *et al.*. Laser Doppler vibrometer for acousto-optic communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):703~706
贺岩,王文奎,夏文兵等.激光多普勒测速计用于水下声光通信[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):703~706