

文章编号: 0258-7025(2008)01-0092-05

新型声光通信激光多普勒信号的鉴频电路

尚建华 贺 岩 臧华国 崔雪梅 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 根据激光多普勒测振技术进行声光通信的工作原理,设计一种新型、小型激光多普勒测振信号鉴频电路。该电路根据外差探测原理,本地振荡器输出信号与探测信号混频得到一路信号,经 90° 移相后的本地振荡器输出信号再与探测信号混频得到另一路信号,利用这两路信号得到了多普勒频移量和声源振动的频率。利用扬声器激发的水面模拟振源进行实验,表明该电路可有效测量的振动频率范围为300 Hz~10 kHz,证明可用于水下光声通信。

关键词 测量;激光多普勒测振;声光通信;外差探测;鉴频电路

中图分类号 TN 958.98 文献标识码 A

New Frequency Discriminating Circuit of Laser Doppler Vibration Signal

Shang Jianhua He Yan Zang Huaguo Cui Xuemei Chen Weibiao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract According to the principle of the acousto-optic communication with the technique of laser Doppler vibration, a novel and compact circuit of frequency discrimination for laser Doppler vibration signal is proposed. Based on the principle of heterodyne detection, one signal is produced by the local oscillator signal mixing with the detected signal and the other signal is produced by 90° phase-shifted local oscillator signal mixing with the detected signal. These two signals are used to acquire the Doppler shift and the sound source frequency. The measurable vibration frequency range can be up from 300 Hz to 10 kHz with the simulating acoustic sound source, and it can be used for the acousto-optic communication.

Key words measurement; laser Doppler vibration; acousto-optic communication; heterodyne detection; frequency discriminating circuit

1 引 言

随着激光多普勒测振技术的飞速发展,可以实现远距离、非接触测量各种微弱振动目标的运动速度及其微小变化。美国海军水下战争中心的 Fletcher A. Blackmon 等^[1,2]在声光通信方面已做了大量研究,提出并验证了声光通信的可行性和有效性。激光多普勒测振技术具有精度高、抗干扰能力强、保密性好等特点,可能成为一种与水下目标通信的技术手段,它消除了水体对激光传输的限制^[3]。

在激光多普勒测振技术中,无失真鉴频是非常关键的技术。利用干涉仪原理直接获取激光回波相位信息^[4,5]的测量方法对光学元件质量和光路校准的要求较高。本文根据相干检测的方法,由光电探

测器直接获得携带相位信息的电信号,利用发展成熟的电子学器件和手段实现多普勒频移信息的提取,增强了系统的灵活性和实用性,利于系统集成以及后期处理。文中介绍了探测的原理和电路的实现方法,并进行了实验。

2 探测原理

激光多普勒测速依靠运动物体散射光与照射光之间的光波频移来获得速度信息,存在光信号从光源—运动介质—光检测器这三者之间的传播关系。采用激光多普勒测振技术实现声光通信的工作原理为:发射一束激光到空气与水的界面上,由于空气与水中的声特性阻抗不匹配,压力释放表面(水体表

收稿日期:2007-05-15; 收到修改稿日期:2007-09-10

作者简介:尚建华(1983—),女,内蒙古人,博士研究生,主要研究方向为激光雷达技术。E-mail:shangjianhua004@163.com

导师简介:陈卫标(1969—),男,上海人,研究员,博士生导师,目前研究方向为激光雷达技术。

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

面)将随入射声场振动,振动频率等于声压产生的振动频率。

水面的振动导致光束传输路径长度不等于水面静止时光束入射的长度,水面运动导致激光束传输长度的改变体现在激光束的相移上,即经水面位置变化调制后对应电磁场的变化可表示为

$$E = E_0 e^{j(2\pi t[f + 2v(t)/\lambda])}, \quad (1)$$

式中 E_0 为激光输出强度, f 为激光频率, λ 为激光波长, $v(t)$ 为表面速度。再将接收到的反射光束与参考光束进行混频,得到法线方向上包含多普勒信息的电压信号

$$V_{\text{out}}(t) = K \cos \left\{ 2\pi t \left[f_0 + \frac{2v(t)}{\lambda} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 f_0 为外差频率, K 为光探测器的转换效率常数。解调(2)式中只包含速度信息的电压信号

$$V_{\text{out}}(t) = \frac{v(t)}{C}, \quad (3)$$

式中 C 为系数因子,一般为 $5 \text{ mm}/(\text{s} \cdot \text{V})$ ^[1]。因此,检测所得的信号经过速度解调和频率检波即可实现由水界面的振动频率测量获知水下声场的发射频率^[1,2,6]。

多普勒相干测振从检测方式上可分为零差检测和外差检测两种。本实验基于外差检测原理,采用人眼安全的波长为 1550 nm 单纵模光纤激光器输出的激光作为本振光信号,通过 55 MHz 的声光调制器(AOM)移频后由光纤环行器经望远镜发射到水面上,返回信号光由同一望远镜和光纤环行器进行接收,再由 HAMAMATSU 公司的带有前置预放的 InGaAs PIN 型光电二极管(具有较高的响应速度和灵敏度)将水面反射的光信号和本振光信号干涉后所得到的光信号转化为电信号,进行后续处理。该装置采用全光纤结构,便于系统集成。激光发射和接收采用同光轴收发,并利用光纤环行器分离发射和接收光路。在水表面底部安装扬声器,对该扬声器发声所引起的水表面振动进行实验研究。相对零差检测方式,外差检测提高了光电信号的信噪比,增强了信号的抗干扰能力,加快了测量速度,并且易于实现高分辨率测量,因而在精密测量中得到了广泛应用^[7]。

3 电路设计

电路原理框图如图 1 所示,高速 PIN 型光电二极管 1 接收含有多普勒频移信息的反射光信号与参考光信号相干后的信号^[8],该光信号经光电转换后

得到的输出电信号又通过截止频率为 55 MHz 的高通滤波器滤除直流成分、抑制低频噪声干扰后,一路与通过振荡频率为 55 MHz 的本地振荡器后的信号共同通过混频器,再经 -3 dB 带宽为 20 MHz 的低通滤波器,得到一路输出信号 1;另一路与经过 90° 移相、振荡频率为 55 MHz 的本地振荡器后的信号共同通过混频器作用后经 -3 dB 带宽为 20 MHz 的低通滤波器得到另一路输出信号 2。通过对两路输出信号进行微分等数学处理,即可解调出振动声源的发声频率以及多普勒频移的方向。由于直接提取了中频信息,降低了对后续数据采集系统的采样速率的要求。

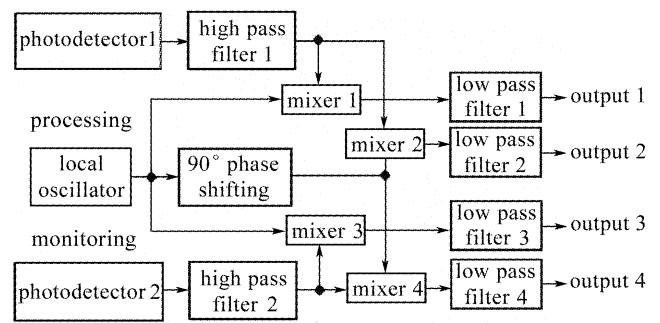


图 1 鉴频电路原理框图

Fig. 1 Block diagram of frequency discriminating circuit

由于电路的信号中心频率高达 55 MHz ,以及电路布线、分布电容等因素,难免引入信号间的串扰和信号自身的失真;同时,本地振荡器和 90° 移相器电路中的部分元器件参数的限制,也可能造成电路自身对待处理的信号存在干扰作用。因此,为了观测以上几方面所带来的误差,在电路的对称位置按照与信号处理路相同的位置关系,用与信号处理路完全一致的元器件设置信号监测路,监测路的高速 PIN 型光电二极管 2 与处理路的高速 PIN 型光电二极管 1 接收同一光信号,这样就可以利用监测路的输出信号 3 和 4 对水面振动信号的变化进行实时波形显示,还可以在系统工作过程中实时检查鉴频电路的工作情况,保证最佳的工作状态。

由于极化作用、系统工作环境和激光器自身频率不稳定性等原因,可能会导致单纵模光纤激光器输出的光信号带有频偏,进而影响频率测量精度。因此,在该电路装置中,可以通过观测扬声器关闭时所获得的输出信号 3 和 4 的状态判断光纤激光器输出光信号的频率稳定性。

在鉴频电路选用无源混频器,相对有源混频器,无源混频器具有动态范围广、互调失真性好的特点。同时,为了抑制电路前端运算放大器的放大和

信号混频时所产生的干扰和杂波并提取出混频后的下变频信号,即多普勒频移信号,又在鉴频电路的最后一级使用了低通滤波器。无源混频器宽带相位噪声、杂散都会直接影响到接收信号的灵敏度,这就要求本地振荡器输出信号具有纯净的频谱。而在该高频电路中,若存在杂频成分,则其频谱相当宽,会在它们共有的电源、地线和印制板中调相、调频振荡器,而调相、调频信号和接近有用信号频率的杂散信号又会进一步通过无源混频器进入接收通道产生干扰。所以为了尽可能保持频谱的纯净并防止接收信道干扰信号的产生,对电源的滤波和级间去耦都进行仔细的设计。印制电路板的优化设计对电路有效、可靠的工作非常关键。

由于晶体振荡器自身带有直流偏置和杂频成分,因此在电路中使用一级 RC 滤去直流分量,使用截止频率为 55 MHz 的带通滤波器消除杂频成分,只保留其中 55 MHz 的频率成分作为本振信号,使本振输出杂波尽可能小,减少对接收信号的干扰。图 2 为本振信号滤波处理前后的波形。

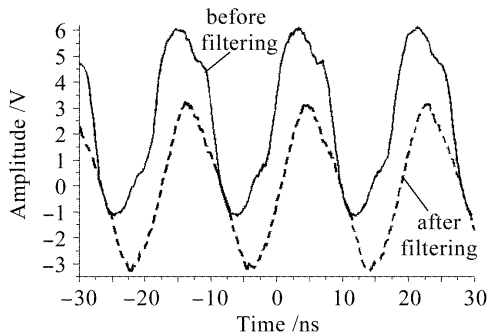


图 2 滤波前后的本地振荡器信号

Fig. 2 Signal of local oscillator before and after filtering

同时,在电路中通过运算放大器和一定长度的同轴电缆实现 90° 移相。选取增益为 1,截止频率为 55 MHz 的运算放大器不仅可以对信号进行延迟以减少同轴电缆的长度,还可对本振信号进行二次滤

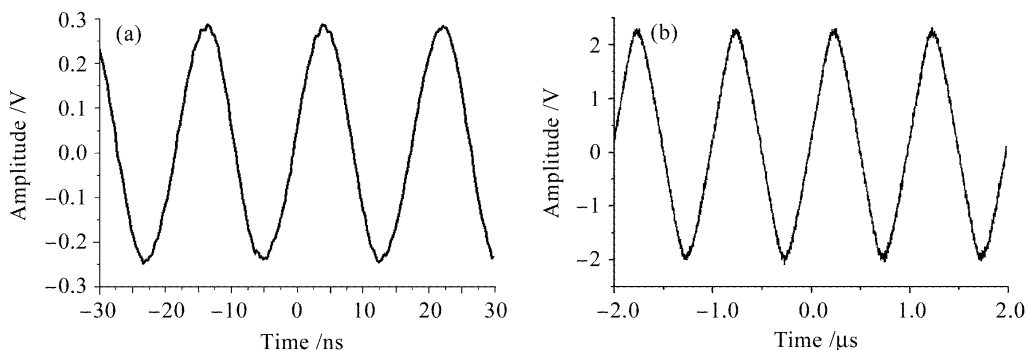


图 3 探测器输入的信号(a)和通过低通滤波器所得的频率为 1.002 MHz 信号(b)

Fig. 3 Input signal of photodetector (a) and output signal with frequency 1.002 MHz by low pass filter (b)

波。其次,信号在特性阻抗为 50Ω 的同轴电缆线上的传输延迟为 5 ns/m,由此可根据信号周期算得在运算放大器延时基础上为达到 90° 移相还需要的电缆长度,从而可方便、可靠地实现 90° 移相。

4 仿真及实验结果

鉴频电路完成后,首先利用标准信号发生器进行性能检验。将信号发生器输出的频率为 56 MHz,幅度为 200 mV 的正弦波信号接入到电路中的探测器位置,模拟光电探测器探测得到的不带频移信息的信号,经过电路装置的鉴频处理后得到非常理想的差频输出信号,如图 3 所示,通过模拟仿真所设计的电路装置所得到的实验结果与预期设想相吻合。

利用该电路装置,并结合 NP Photonics 公司的波长为 1550 nm 的单纵模光纤激光器、脉冲/函数发生器、收发望远镜等,组成一个激光多普勒测振实验装置。模拟水面的底部放置一个扬声器,调整激光束使其聚焦到水面位置。利用函数发生器输出幅度、频率不同的声信号驱动扬声器,激光多普勒测振装置接收混频光信号,利用所设计的电路装置进行振动频率的鉴别。该实验是为了确定激光多普勒测振装置对声源发声频率测量的一致性和范围,进而验证激光多普勒信号的鉴频电路应用于声光通信的可行性和有效性。

以 100 Hz 的步长,输出声频率从 300 Hz ~ 2 kHz 变化,再以 1 kHz 为步长,从 2 ~ 10 kHz 变化,共进行 27 组相应振动频率的实验数据测量。图 4 是当函数发生器频率为 300 Hz, 7 kHz 和 10 kHz 时,水表面运动的相干检测波形。保持函数发生器输出信号幅度不变,记录不同频率时所接收到的信号 1 和信号 2 的数据,选出测量长度接近一个振动周期的数据进行分析。图 4(a), (b) 为示波器直接获得的信号 1 和信号 2 的数据波形,图 4(c) 为相应数据

频率解调并滤波后得到的波形。通过频谱分析又分别得到了相应频率时的频谱,从图 4(d)可以看出,

测量到的频谱对应的频率分量与函数发生器的信号输出频率一致,实现了信号的可靠解调。

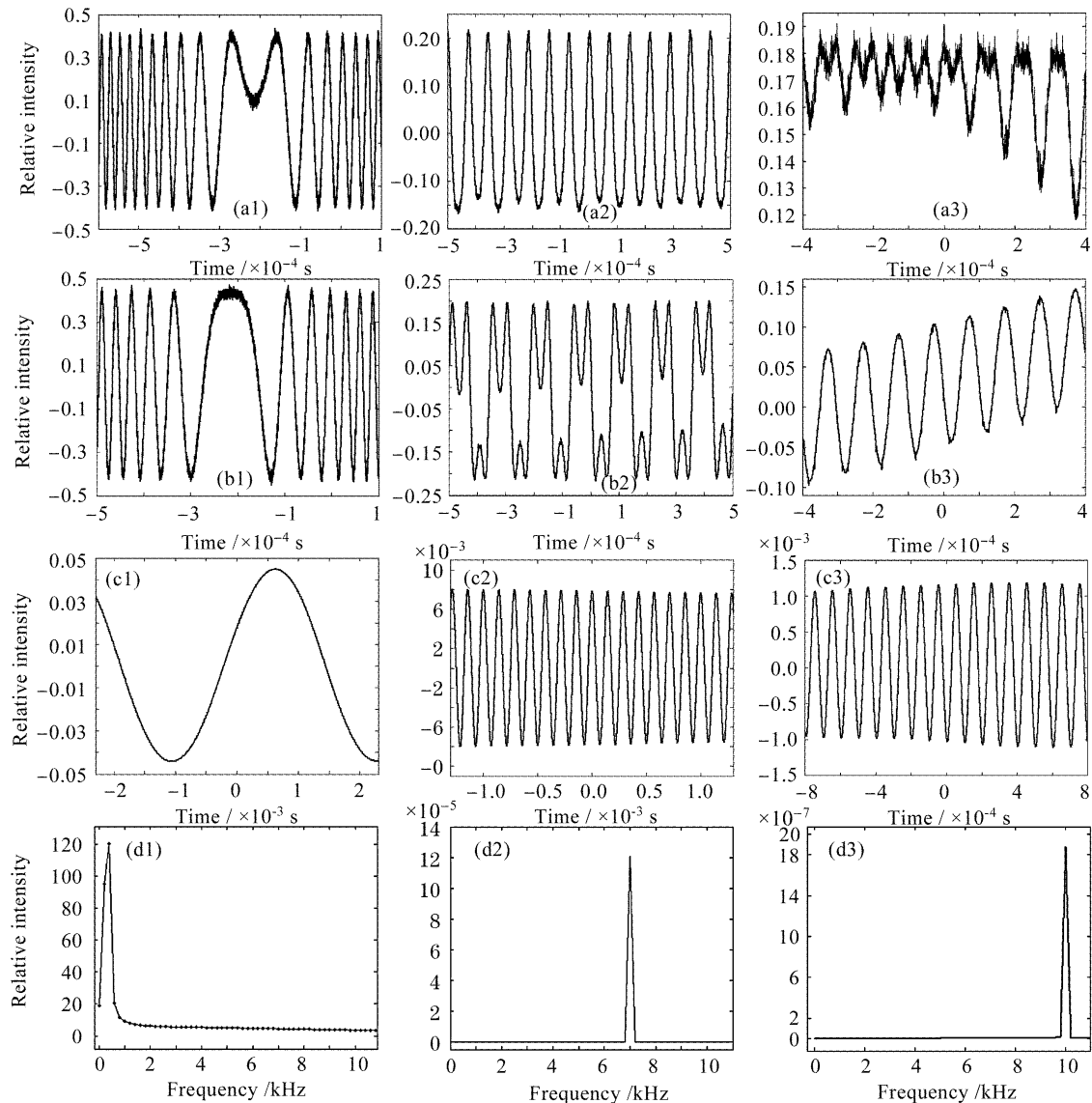


图 4 输出信号 1(a),输出信号 2(b),水面振动速度的时间序列波形(c)和水面振动速度的频谱(d)

Fig. 4 Output signal 1 (a), output signal 2 (b), time series waveform of surface vibration velocity (c) and spectrum of surface vibration velocity (d)

(a1)~(d1) 300 Hz; (a2)~(d2) 7 kHz; (a3)~(d3) 10 kHz

5 结 论

设计了一种多普勒测振信号鉴频电路,通过实验验证该电路装置可有效测量振动界面为水表面时的振动频率范围为300 Hz~10 kHz。同时,表明应用该鉴频电路测量声光通信中7 kHz声波频段时水表面的振动信号,能够获得声源发出的声波频率。还可将振动界面换为玻璃和水面,调整输出函数发生器输出信号幅度值为不同情况,即对应不同声压级时进行多普勒信号的鉴频,从而确定不同界面时可以检测到的信号频率范围和灵敏度,验证通信的

可行性和有效性。使用该电路装置可使声光通信系统更加稳定、小型化,便于系统的整合,利于操作,可实现安全非接触探测,从而使通信更加安全,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Fletcher A. Blackmon, Lynn T. Antonelli. Experimental detection and reception performance for uplink underwater acoustic communication using a remote, in-air acousto-optic sensor [J]. *IEEE J. Oceanic Engng.*, 2006, **31**(1):179~187
- 2 Lynn Antonelli, Fletcher Blackmon. Experimental demonstration of remote, passive acousto-optic sensing [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, **116**(6):3393~3403

- 3 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
- 4 Xiaolinzhuozi. Laser Doppler vibroscope [J]. *Foreign Measure*, 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
- 5 Hong Xin, Zhang Haixiang, Jiang Chengzhi *et al.*. Laser Doppler measuring technique and its application [J]. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 1998, **18**(3):3~5
洪 昕,张海翔,蒋诚志 等. 激光多普勒测量技术及其应用[J]. *航空计测技术*, 1998, **18**(3):3~5
- 6 Richard H. Belansky, Keith H. Wanser. Laser Doppler velocimetry using a bulk optic Michelson interferometer; A student laboratory experiment [J]. *Am. J. Phys.*, 1993, **61**(11):1014~1019
- 7 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. 激光多普勒振动计用于水下声光通信[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):703~706
- 8 Qu Shesheng. The technology of signal detection in fiber-optic interferometer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2000, **21**(4):29~34
屈社省. 光纤干涉仪信号检测技术[J]. *应用光学*, 2000, **21**(4):29~34