

文章编号: 1001-3806(2004)02-0190-03

激光多普勒检波系统的研究

贺顺忠, 姚 欣, 蒋诚志, 杜振辉, 刘金凤

(天津大学 测试计量技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了进一步提高地震检波器的指标, 研究了激光多普勒测量方法和微弱信号检测技术等, 设计出了一种 LD 做光源的差动式激光多普勒检波系统, 此系统采用高斯光束聚焦、大口径透镜接收, 能接收到很强的多普勒信号, 并且具有高的空间分辨力, 同时, 采用声光调制技术及锁相放大技术, 提高了信号的信噪比, 其结构简单、紧凑, 装调方便, 光能利用率和空间分辨力高, 可测频率范围为 0.5Hz~1000Hz; 振幅范围为 2 μ m~5mm; 频率测量精度为 0.6%; 振幅测量精度为 1%。

关键词: 差动检波; 激光多普勒; 声光调制; 锁相放大

中图分类号: TH744.5 文献标识码: A

Study on demodulation system of laser Doppler

HE Shun-zhong, YAO Xin, JIANG Cheng-zhi, DU Zhen-hui, LIU Jin-feng

(National Laboratory of Precision Measuring and Testing Technique and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To improve the specifications of seismometers, laser Doppler measurement technique and weak signal detect technology and etc are studied, and a differential Doppler demodulation system with a LD is designed. In this system, more Doppler signals are received and more space resolving power are achieved because of adopting Gaussian beams focus and lens with large diameter as well as acoustooptic modulation technology and lock-in amplifier used to improve SNR. It has characteristics of simple structure, fixing and adjusting convenience, high use-ratio of light power and space resolution. The measurable ranges of frequency and amplitude are 0.5Hz~1000Hz, 2 μ m~5mm respectively, and the corresponding measurement precisions are 0.6%, 1% respectively.

Key words: differential demodulation; laser Doppler; acoustooptic modulation; lock-in amplifier

引 言

在地球物理勘探方法中, 地震勘探以其高精度、高分辨力和很大的穿透深度等优点已成为应用最广的一种勘探方法。它是以人工地震反射波为被测信号的一种探测方法, 主要用于探明地下地质构造, 寻找石油、气藏、煤炭以及其它矿藏。

地震勘探技术及仪器或检波器已有几十年的发展历史。在 90 年代以前, 普遍使用的是电磁动圈式检波器, 其动态范围在 40dB~60dB 之间; 之后, 为了满足高分辨力地震勘探的要求, 国外推出电磁超级检波器, 如荷兰的 SM-24 超级检波器, 美国的 UM-2^[1], 日本的 G3-32CT 等, 与常规检波器相比其

技术指标有明显提高, 如动态范围可达到 70dB, 畸变, 如 UM-2 可达到 0.05%。但是这些检波器的所测频率范围(目前在 100Hz 以内)、振幅动态范围、精度等指标还不能令人满意。为此, 进一步研究了高精度地震勘探检波器技术及相关理论, 尤其是激光多普勒测量方法^[2](但其信号非常微弱)和微弱信号检测技术及信号处理方法, 并设计出一种高强度、高信噪比和高分辨力的激光多普勒检波系统。实验结果证明, 这种检波系统的可测频率范围、振幅范围及其精度等均获得较满意的效果。

1 激光差动检波系统及其设计

图 1 为所设计的差动式检波光学系统。由半导体激光器 LD 发出的光($\lambda=650\text{nm}$)经 $\lambda/2$ 波片后以布喇格角入射到声光调制器 A(其调制频率 $f_c=40\text{MHz}$)上, 输出频率为 f_0 的零级衍射光和频率为 (f_0+f_c) 的 +1 级衍射光。两衍射光各自经反射棱镜 R(其两个反射面的反射率都为 99.9%)、反射镜

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40274046)

作者简介: 贺顺忠(1945), 男, 副教授, 主要从事物理光学、光电子学、激光光电检测技术等研究。

E-mail: hszhong_student@sina.com

收稿日期: 2003-07-18; 收到修改稿日期: 2003-10-13

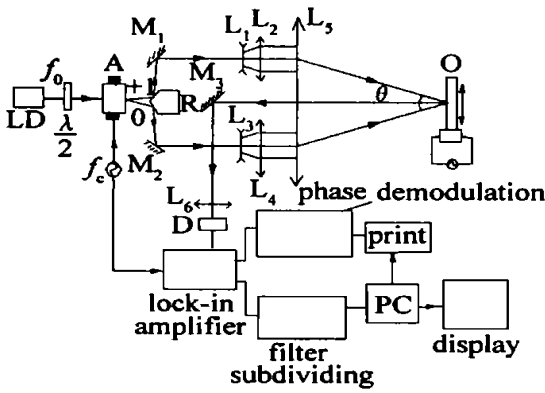


Fig. 1 Differential demodulation system

M_1, M_2 反射, 并分别由 L_1, L_2 和 L_3, L_4 准直扩束后, 由位于 L_2, L_4 像方焦面上的 L_5 镜聚焦在振动体 O (其振动频率、振幅可用丹麦生产的振动台来控制) 上, 它们差动后的散射光再经 L_5, M_3 和 L_6 会聚在光电接收器 D 的光敏面上产生光电信号, 并与参考信号一起输入锁相放大器, 拾取多普勒信号, 然后经限幅、鉴相、滤波、细分等程序, 最后由计算机计算处理得物体 O 的振动参数。

其中入射到 L_1, L_3 镜上的光斑半径为 2mm , 若设 $F_1 = F_3 = -20\text{mm}, F_2 = F_4 = 40\text{mm}, F_5 = 300\text{mm}$ ($\Phi_{1,3} = 8\text{mm}, \Phi_{2,4} = 12\text{mm}, \Phi_5 = 140\text{mm}$), 则入射高斯光束经 $L_1 \sim L_4$ 准直扩束后将变成半径为 4mm 的准直光束, 它们经位于 L_2, L_4 像方焦面上的 L_5 镜聚焦成一个很小的光斑。事实上, 根据高斯光束束腰聚焦理论^[3], 这时 $L_5 = 0, w_{50} = 4\text{mm}, f_5 = \frac{\pi w_{50}^2}{\lambda} = (3.14 \times 4^2) / (0.65 \times 10^{-3}) = 77292\text{mm} \gg 300\text{mm}, w_{50}' = w_{50} / \sqrt{1 + (f_5/F_5)^2} = 4 / \sqrt{1 + (77292/300)^2} = 0.0155\text{mm} \approx 0.016\text{mm}, L_5' = \frac{F_5}{1 + (F_5/f_5)^2} \approx F_5 = 300\text{mm}$ 。

可以看出, 此差动系统的最大优点是, 能使两束高斯光束束腰以较大的角度 θ 会聚在振动物体表面上, 并能采用大口径透镜接收振动物体散射的光(能充分利用激光能量), 因而能得到很强的多普勒信号和高的空间分辨力; 同时还因采用 40MHz 的声光调制器分光, 低噪声的 PIN 管光电混合集成器件接收光电信号, 以及用锁相放大器拾取含有振动信息的多普勒信号等而得到高信噪比的信号。此外, 此光路结构紧凑、简单(采用 LD 作光源), 装调方便, 并可实现非接触测量和遥测。

2 测量原理

由于物体 O 是使用丹麦生产的振动台(用频

率、幅度可调的正弦电压激励的) 来模拟地震振动的, 所以物体的位移可以写成:

$$x = A \cos 2\pi \nu t \quad (1)$$

式中, A 为物体的振幅, ν 为振动频率。其瞬时速度为:

$$v = \frac{dx}{dt} = 2\pi \nu A \sin 2\pi \nu t = \nu_0 \sin 2\pi \nu t \quad (2)$$

这时, 产生的多普勒频移^[2]为:

$$\Delta f = \frac{2\nu}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

由此所对应的散射光为:

$$E_s = A_s \cos(\omega_c t - 2kA \sin \frac{\theta}{2} \cos 2\pi \nu t) \quad (4)$$

式中, $\omega_c = 2\pi f_c, k = 2\pi/\lambda, \lambda = 650\text{mm}$ 为激光波长。

从锁相放大器输出的信号为:

$$V(t) = A_V \cos(2\pi A \sin \frac{\theta}{2} \cos 2\pi \nu t) \quad (5)$$

这是一个等幅的调相波, 其典型的波形如图 2 所示。可见, 此信号具有明显的周期性, 其周期 $T = 1/\nu$ 。它可直接由示波器读出。每个周期内存在两个波形稀疏区, 两个相邻稀疏区的时间间隔为 $T/2$ 。还可以读出相邻两稀疏区内信号的周期数 N , 其中所对应的位相变化为 $\delta = 2\pi \nu$ 。

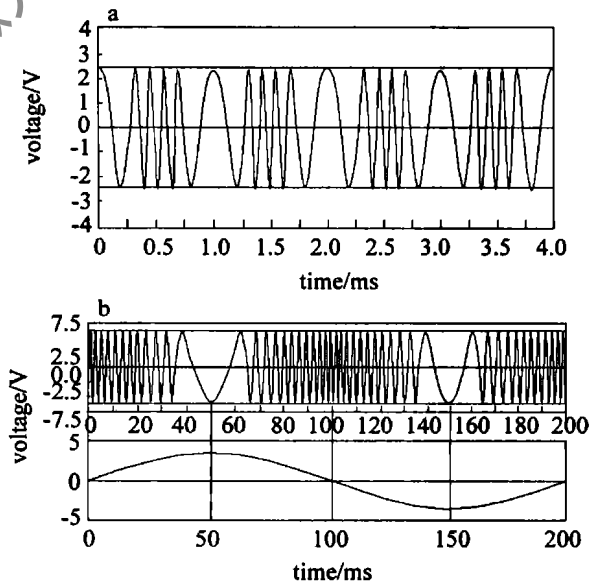


Fig. 2 Phase modulation wave shape

由(5)式可知, 调相波的位相 φ 为:

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} A \sin \frac{\theta}{2} \cos 2\pi \nu t \quad (6)$$

其瞬时角频率为:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{4\pi A \cdot 2\pi \nu}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \sin 2\pi \nu t \quad (7)$$

这时, 相邻两稀疏区的位相变化 δ 可由下式求出, 即:

$$\delta = \int_0^{T/2} \omega dt = \int_0^{T/2} \frac{4\pi A \cdot 2\pi \nu}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \sin 2\pi \nu t dt =$$

$$\frac{8\pi A}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} = 2\pi \cdot N \quad (8)$$

由此得:

$$A = N \cdot \frac{\lambda}{4\sin(\theta/2)} \quad (9)$$

可见,由调相波波形图读出两相邻疏区间的信号变化的周期数 N ,就可以算出振动物体的振幅 A 。此外,由(2)式、(3)式、(5)式分析,不难得出激励电压与信号波形的对应变化关系,如图 2b 所示。

由(9)式分析可得此方法的理论精度应为 $\frac{\lambda}{4\sin(\theta/2)}$ 。若 $\lambda = 650\text{nm}$, $\theta = 23^\circ$,则其精度约为 $0.8\mu\text{m}$ 。如果对信号进行滤波、细分或频谱分析等处理,则振幅测量精度可以达到 $0.1\mu\text{m}$ 。

3 实验结果

利用以上设计的差动式检波系统和丹麦生产的振动台 (Brüel & Kjær (BK) sine random generator type1027, power amplifier type2706) 进行频率、振幅的模拟比对测试,每一振幅和频率均测 10 次,取平均值并将数据列于表 1 中。

Table 1 Data of frequency and amplitude of the differential demodulation system

No.	frequency/Hz		amplitude/ μm	
	comparative value	measurement value	comparative value	measurement value
1	0.5	0.5	498.00	497.25
2	5	5	3500.30	3482.30
3	10	10	2000.00	2017.72
4	20	19.9	1540.60	1526.83
5	30	30.1	720.00	726.40
6	50	50.3	270.20	271.43
7	80	80.0	110.20	109.31

(上接第 185 页)

心波长较大的情况。对于同一个 $\Delta\delta$ (对应同一波长),若 $\Delta\delta_F < \Delta\delta$,说明该复合波片具有消色差作用, $\Delta\delta_F$ 越小,说明该复合波片的消色差能力越强。

参 考 文 献

- [1] 苏美开,李国华,宋连科.激光技术,1996,20(1):29~31.
- [2] 魏光辉.矩阵光学.北京:兵器工业出版社,1995.156~157.
- [3] 云茂金,李国华,王美.中国激光,2001,28(9):821~822.

continue

No.	frequency/Hz		amplitude/ μm	
	comparative value	measurement value	comparative value	measurement value
8	100	100.4	55.50	56.05
9	200	201.1	42.70	42.53
10	300	302.1	31.50	31.25
11	400	400.0	20.30	20.12
12	500	498.0	17.40	17.32
13	600	603.2	14.20	14.28
14	700	701.7	10.60	0.67
15	800	804.2	5.00	4.95
16	1000	1003.5	4.50	4.47

由上表可知,本检波系统的频率测量精度为 0.6% ,振幅测量精度为 1% (事实上,其最小可测振幅可到 $2\mu\text{m}$)。

4 结 论

以上实验结果表明,所设计的激光多普勒差动式检波系统(使两束高斯光束束腰以较大角度聚焦在振动体上)的技术指标是令人满意的。如果再对信号进行整形,改善光学系统及信号处理和计算方法等则会进一步提高系统的性能,那时,它可用于地球物理勘探,成为地震勘探中的一种新的高精度、高分辨力的方法。

参 考 文 献

- [1] 付清锋,周明.石油仪器,2000,14(2):25~27.
- [2] DRAIN L E.激光多普勒技术.北京:清华大学出版社,1980.105,137.
- [3] 周炳琨,高以智,陈家骅.激光原理.北京:国防工业出版社,1980.345~357.
- [4] 李国华.激光测量学(第六章,偏光技术与偏光器件).北京:科学出版社,1998.223.
- [5] 李国华,苏美开,宋连科.中国激光,1992,19(1):41~42.
- [6] 李国华,苏美开,宋连科.曲阜师范大学学报(自然科学版),1990,16(3):54.
- [7] SCHIRMER J, SCHMIDT-KALER T. Opt Commun, 2000, 176: 313~317.
- [8] 魏光辉.矩阵光学.北京:兵器工业出版社,1995.172.
- [9] 云茂金,李国华,王美.光电子激光,2001,12(6):562~563.
- [10] 周军,程桂建,苏桂英.光电子激光,2001,12(4):368~378.