

文章编号: 0253-2239(2005)06-795-4

高空遥测激光多普勒检波系统研究*

贺顺忠 刘金凤 蒋诚志 杜振辉 黄福祥

(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: 为解决远距离处人工地震波的检测问题,研究了光源的相干性,系统的稳定性,激光多普勒信号强度、信噪比,位移测量灵敏度和精度等理论及方法。采用在腔内插入两个直径为 1.8 mm 的可变光阑和输出光的准直结构(4 倍),增大光源的相干长度和可测距离;在两路光中分别加入声光调制器和 $\lambda/4$ 波片,实现偏振态匹配并使系统工作更稳定,提高信噪比;采用透镜聚焦接收,增大信号强度;采用特伦逆向反射装置,消除它在位移或振动过程中因偏摆或横移所带来的影响,使测量灵敏度和精度提高约一倍。将此系统用于 2 m 处的振动进行原理性实验,其振幅测量相对误差为 0.1%,可测频率最高为 750 Hz,因此可用于高空遥测人工地震波。

关键词: 光学测量; 激光多普勒检波; 地震波遥测; 远距离测量; 特伦逆向反射系统

中图分类号: TH744.5 文献标识码: A

Study on Laser Doppler Demodulation System Applied to Remote Measurement in High Altitude

He Shunzhong Liu Jinfeng Jiang Chengzhi Du Zhenhui Huang Fuxiang

(The National Key Lab of Precision Measuring and Testing Technique and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: To measure artificial seismic wave with high accuracy in remote distance, the theory and methods of coherence of light resource, stability of system, intensity and signal to noise ratio (SNR) of laser Doppler signal, and sensitivity and accuracy of displacement measurement are investigated. Two optical stops (whose diameter is 1.8 mm) inserted into the resonant cavity and collimating structure of light output ($4\times$) are adopted to increase coherent length and measurable distance. Acousto-optical modulation device and $1/4$ wave plate are inserted respectively into two light paths to implement the matching of polarization, to make the system more stable and the SNR higher. The lens focusing is adopted to increase signal intensity. Trent reverse reflection device is adopted to offset the effect caused by beat and cross sliding during displacement or vibration and to enhance measurement sensitivity and accuracy nearly one time. Through the principle experiment of vibration in 2 m distance by using above system, the measurement relative error of amplitude is of 0.1% and the measurable frequency up to 750 Hz are obtained. So the system can be applied to remote measurement of artificial seismic wave in high altitude.

Key words: optical measurement; laser Doppler demodulation; seismic wave remote sensing; measurement in remote distance; Trent retrodirective reflection system

1 引 言

为了勘探石油、天然气、矿藏、地热、水文地质、工程地质等地下资源和信息,人们开发研究了各种勘探方法,其中地震波勘探方法是发展历史最长、技术最成熟、应用最广、最有效的一种勘探方法。这种方法是人工地震反射波为检测信号的勘探方法。

但是长期使用的各种检波器都远落后于高分辨力、高精度的地震勘探的要求。其不足之处是动态范围小,频带窄,精度和分辨力较低,而且检波器的固有频率使得 10 Hz 以下的的数据丢失。此外,检波器的精度,接收方式和工作效率还受地形、地势的影响很大。并且检波器的埋置,回收和连接电缆费时、昂

* 国家自然科学基金(40274046)资助课题。

作者简介: 贺顺忠(1945~),男,湖南邵东人,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: 2004-08-31; 收到修改稿日期: 2005-03-06

贵,因此研究新型的检波器是十分重要的。

美国壳牌石油公司(Shell Oil Company)最早提出了摒弃传统地震检波器的“高空遥测”方案^[1,2]。这是一种有潜力的测量方法,能够降低测量成本和时间,易于实现高精度检测。由于被测振动速度很小(10^{-9} m/s),大地的反射率低且地区间差别很大等,遥测地震波比其他遥测难度更大。本文在研究人工地震反射波的波谱及其规律、激光多普勒振动测量技术和信号处理技术的基础上^[3~6],设计一种适用于空中遥测地震波的光学系统,实验验证此系统的可行性。

2 原理与系统

2.1 激光器的模式选择

由激光原理可得^[7],平凹谐振腔(如图 1 所示)的空腔谐振频率为

$$\nu_c = \frac{C}{2L} \left[q + \frac{1}{\pi} (1 + m + n) \arccos \sqrt{g_1} \right], \quad (1)$$

式中 L 为腔长, q 为纵模序数, m, n 为横模序数, $g_1 = 1 - L/R_1, R_1$ 为输出镜的曲率半径,且 $R_1 > L$ ($R_2 = \infty, g_2 = 1$)。

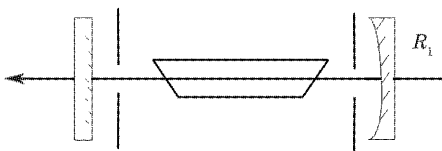


图 1 平凹谐振腔原理

Fig. 1 Schematic diagram of plano-concave resonant cavity

可见,平凹腔的谐振频率含有多个纵模和横模,其输出激光束的单色性和相干性差。为了使系统适应远距离高精度测量,首先应使激光束是基横模的。但是,由于实验室常用的 He-Ne 激光器(其毛细管直径为 2 mm)在经过较长时间的使用后,其模式结构发生了一定的变化,相干长度变小。因此,在腔内插入两个可变光阑可抑制掉高阶横模(直径约 1.8 mm),并且,输出光用扩束准直系统改善其波面质量,又能进一步提高其相干性^[8]。

2.2 特伦逆向反射系统

系统结构如图 2 所示。它由一个角锥棱镜和一个平面镜所组成,其平面镜固定不动并调成与光束垂直。

由于平面镜的作用,无论角锥棱镜在移动或振动过程中发生了偏摆或横移,其反射光束都能沿原路返回,它的这一特点克服了单用角锥棱镜时所带

来的对横移敏感的不足^[9](即增大了位移或振幅的测量误差)。特别是利用这种反射装置可使系统的灵敏度或测量精度提高一倍。事实上,由于平面镜的作用,光会来回经过角锥棱镜,因此当被测物体位移 x 时,其光程差的变化^[10]为

$$\delta l = 4x, \quad (2)$$

对应的多普勒频移为

$$\Delta f = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta l}{dt} = \frac{4v}{\lambda}. \quad (3)$$

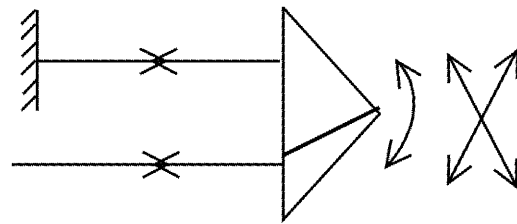


图 2 特伦逆向反射系统

Fig. 2 Trent reversed reflection system

2.3 激光多普勒检波系统

图 3 为利用激光多普勒效应的参考光检波系统的原理图。

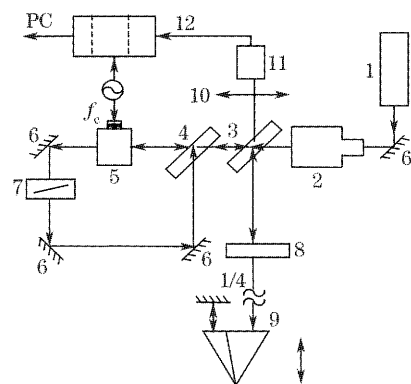


图 3 检波系统原理

Fig. 3 Schematic diagram of demodulation system

从激光器 1(如图 1 所示)输出的激光(f_0)经扩束准直系统 2 之后由分束镜 3 分成两束光,其中透射光经分束镜 4,声光调制器 5(使一级衍射光光矢量偏转 90°),反射镜 6,可变衰减器 7,又经 4、3 镜(作为参考光)反射进入光电接收器 11 中。而另一反射的光则经 $\lambda/4$ 波片 8 并由特伦逆向反射系统 9 作用沿原路返回,再经 3 镜透射作为测量光束进入接收器 11 中,最后两光差拍输出的信号与超声信号源输出的信号混频后拾取多普勒信号。图中 12 包括放大、混频和频率跟踪等环节。将多普勒信号输入计算机进行信号处理并经计算得出振动的振幅和频率值。

系统对激光器及其输出采取上述措施可实现基

横模准直,有利于提高激光的相干长度和远距离测量;此光路在实现偏振态匹配的同时,使激光器工作更稳定;此外,利用声光调制器和可变衰减器可进一步提高信噪比,利用一透镜将两差拍光聚焦,还可提高信号强度;特别是,采用特伦逆向反射装置可消除在位移或振动过程中所带来的不利影响,有利于提高测量精度,即它能使测量灵敏度和精度提高一倍。

如果被测体作简谐振动,即振动位移

$$x(t) = A \cos \Omega t, \quad (4)$$

则其瞬时速度为

$$v(t) = \dot{x} = A\Omega \cos(\Omega t + \pi/2), \quad (5)$$

式中 Ω 为振动角频率 $\Omega = 2\pi f$, A 为振幅。

于是从混频器输出的电压信号或多普勒信号为

$$V(\nu) = A_V \cos(4kA \cos \Omega t) = A_V \cos[4kx(t)] = A_V \cos\left(\int 2\pi \cdot \frac{4\nu}{\lambda} dt\right), \quad (6)$$

这是一个受振动速度调制的调频信号。不难看出,这种多普勒信号频率随振动速度由大到小变化两次,对应的波形由疏到密也变化两次,即在一个振动周期中有两次疏密变化周期,因此振动体的振幅 A 为半个周期位移的一半,即

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} v(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} \frac{\lambda}{4} \Delta f dt = N_A \cdot \frac{\lambda}{8}, \quad (7)$$

式中 N_A 为半个周期中的拍频次数或相邻疏区的差频信号变化的周期数。

可见,只要对多普勒信号进行解调,并对半个周期内的拍频计数再进行相应的计算就可得到振动的振幅和频率。显然,计数精度还直接影响振幅测量精度,因此采用细分的办法又可以进一步提高测量精度。

3 实验结果

利用图 3 所示系统在防振台上进行低空处(2 m)的振动原理性实验。所用 He-Ne 激光器输出功率为 5 mW,实验振动台选用丹麦 BK(Brüel & Kjaer)公司生产的振动设备:其激振器(4089),功放(2706),信号发生器(1027);数据采集、处理是基于 NI 公司的 Labview,采集卡采用 DAQ. PCI6023E。

测量前,先启动激光器,半小时后开始调光路。加上声光功率,先调节声光调制器 5 的方位,实现布拉格角入射(这时一级衍射光光矢量偏转 90°);然后转动 $\lambda/4$ 波片的快轴,使其与由镜 3 反射来的激光光

矢量成 45° 角,从而使两路光的偏振态一致,即均垂直于激光器输出光的光矢量;再调节特伦逆向反射镜使光沿原路返回保证测量灵敏度和测量精度的提高,并转动可变衰减器 7 使两路光在 11 处的强度尽量相等;最后仔细调节两差拍光的重合,当信号符合要求时,将整个系统联机,进行振动振幅和频率的测量,将结果与振动设备上所选取的值列表进行比对(实验时对振动设备上的每一选定频率和振幅进行比对测量,反复测 6 次,并取平均值列于表 1 中)。

表 1 振幅、频率测量值

Table 1 Measurement values of amplitude and frequency

No.	Frequency of comparative value / Hz	Frequency of measurement value / Hz	Amplitude of comparative value / μm	Amplitude of measurement value / μm
1	0.50	0.50	3280.00	3276.82
2	1.00	1.00	2650.00	2648.65
3	4.00	3.98	2001.86	2000.00
4	8.00	8.05	1850.30	1849.55
5	10.00	10.06	1500.10	1502.74
6	20.00	20.18	1000.12	999.15
7	24.00	23.78	500.20	499.25
8	30.00	29.80	200.44	200.65
9	50.00	50.50	100.41	99.42
10	60.00	60.54	82.50	82.58

由表 1 中的实验数据不难得出:低空 2m 处振幅测量误差为 0.1%,频率测量精度为 1%。由实验还得出此系统的可测频率范围为 0.5~750 Hz;可测振幅范围为 0.1~8 mm。

由于此系统要求激光器输出一定功率的激光(5 mW 以上),这使得偏振光的消光位置(或 $\lambda/4$ 波片的快轴方位)很难准确判断;以及声光调制器的布拉格入射角也很难调准。因此,两路光总会有一小部分返回到激光腔中引起“跳模”,使输出光不稳定。从(3)式、(5)式、(7)式不难看出,这使振幅测量精度不能提高一倍,特别是频率测量精度受到的影响更大,同时,光源的相干性也随之变差,致使高空遥测距离受到限制。

4 结 论

实验研究表明在使用图 3 所示的系统进行原理性实验中,其振幅和频率的测量精度直接受到激光器输出波长稳定性的影响,影响较大的是频率测量精度,因此,在实际应用中,为了得到较稳定的波长输出,应当采用高精度的光电自动调试方法来调节 $\lambda/4$ 波片的快轴方位和声光调制器的布拉格入射

角,从而进一步提高其指标,使它能够应用于高空遥测地震波。

参 考 文 献

- 1 Berni Albert. Remote seismic sensing[P]. *U. S. Patern*, 1992, 5109362
- 2 Berni Albert. Apparatus for remote seismic sensing of array signals using side-by-side retroreflectors [P]. *U. S. Patern*, 1994, 5327216
- 3 Hong Xin, He Shunzhong, Jiang Chengzhi. Remote displacement measurement of solid scattering surface utilizing laser Doppler effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 118~121 (in Chinese)
洪 昕,贺顺忠,蒋诚志. 用激光多普勒效应远距离测量固体散射表面的位移[J]. *光学学报*, 2001, **1**(1): 118~120
- 4 Zhang Xiaoyuan, Hong Xin, He Shunzhong. Study on measurement technique of scattering-surface displacement utilizing laser Doppler effect[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **27**(8): 751~755 (in Chinese)
张宵元,洪 昕,贺顺忠. 散射面位移激光多普勒测量技术的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8): 751~755
- 5 Zhang Xiaofang, Wang Baoguang, Jiang Chengzhi *et al.*. A reference optical system of laser Doppler longitudinal displacement measurement[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **B10**(2): 97~101
- 6 Shunzhong He, Xin Yao, Chengzhi Jiang *et al.*. Design of differential optical system of in-plane remote displacement measurement[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **2**(3): 145~146
- 7 Wu Changzheng, Wang Zhaoyong, Chen Lingbing *et al.*. *Laser Physics* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1989. 24 (in Chinese)
伍长征,王兆永,陈凌冰等. *激光物理学* [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1989. 124
- 8 M. T. Paleluefe, A. H. Gaulubifeu. *Laser Application to Earth Measurement* [M]. Optical Equipment Teaching and Researching Group in Zhejiang University transl., Hangzhou: Zhejiang University Press, 1976. 96~97 (in Chiense)
M. T. 帕里列夫, A. H. 高鲁别夫. *激光在大地测量中的应用* [M]. 浙江大学光学仪器教研室译. 杭州: 浙江大学出版社, 1976. 96~97
- 9 Zhuo Yongmo, Bao Zhenglian. *Coherence Measurement Equipment and Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992. 51~56 (in Chinese)
卓永模,包正廉. *相干计量仪器与技术* [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 51~56
- 10 L. E. Drain. *The Laser Doppler Technique* [M]. Wang Shikang, Shen Xiong, Zhou Zuoyuan transl., Beijing: Tsinghua University Press, 1980. 56~57 (in Chinese)
L. E. Drain. *激光多普勒技术* [M]. 王仕康,沈熊,周作元译. 北京: 清华大学出版社, 1980. 56~57