

文章编号: 0253-2239(2007)02-0249-4

变光外差为电外差的双频激光探测*

李 磊 赵长明 高 岚 孙鑫鹏 杨苏辉

(北京理工大学信息科学技术学院, 北京 100081)

摘要: 演示一种双频激光位移探测系统, 阐述光载波激光雷达的概念。由单块非平面环形腔固体激光器和声光调制器产生 100 MHz 载波频率的双频激光束, 作为探测光束, 经过光路收发系统, 探测位于电动导轨上目标的位移变化, 信号处理部分采用高速光电探测器响应后信号的电子外差解调方式, 位移量的获得通过高频锁相放大器解算参考光束与信号光束的相位差并计算获得。通过双频激光把光学外差探测变为了电子外差探测, 系统重复误差小于 3%。系统在利用无线电雷达信号处理方式的同时, 保留了激光探测的优点, 位移测量系统具有良好的重复性。

关键词: 光学测量; 激光雷达; 双频激光探测; 拍频; 外差

中图分类号: TH741.1; TH745.2 文献标识码: A

Laser Detection by Electronic Instead of Optical Using Two-Frequency Laser

Li Lei Zhao Changming Gao Lan Sun Xinpeng Yang Suhui

(School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: A ranging system using two-frequency laser was demonstrated, and the lidar-radar system concept was introduced. The two-frequency coherent laser beam carrying 100 MHz radio beat frequency was obtained by a monolithic nonplanar ring single-frequency oscillator and an acousto-optical modulator, and used as a probe. Through the optical transmitting and collecting system, the displacement of the object mounted on a motorized translation stage was detected. In the signal processing, the electronic heterodyne demodulation method was adopted to deal with the signals received by high-speed photodiodes. The displacement was obtained by calculating the phase difference between reference and detection signal achieved by a high-frequency lock-in amplifier. The ranging system turns optical heterodyne into electronic heterodyne demodulation, and the repetition error is less than 3%. The system takes advantage of the signal processing technologies of radar, and meanwhile, maintains the advantages of laser detection. The ranging system provides a good repetition.

Key words: optical measurement; lidar; two-frequency laser detection; beat frequency; heterodyne

1 引 言

在电磁波目标探测和识别技术中, 激光雷达^[1]和无线电雷达^[2]各有优势。与普通无线电雷达相比, 激光雷达具有更小的传输孔径, 可以获得高的空间分辨力; 相干激光雷达采用外差探测法可以同时得到目标的距离和速度信息^[3], 但是光学系统调整

难度大, 稳定性和可靠性需要进一步提高。无线电雷达能够实现多普勒测速, 且技术成熟。因此有人尝试把激光雷达和无线电雷达结合起来, 将无线电雷达频域范围的频率调制到激光束上, 产生了用激光作为探测媒介, 信号处理采用无线电雷达技术的光载波激光雷达(Lidar-radar)模型^[4]。相类似概念

* 国防技术基础项目(J1900B003)资助课题。

作者简介: 李 磊(1971-), 男, 河南人, 博士研究生, 主要从事新型固体激光器及激光雷达技术的研究。

E-mail: lloasis2000@yahoo.com.cn

导师简介: 赵长明(1960-), 男, 河北人, 教授, 博士生导师, 主要从事固体激光技术和激光雷达系统的研究。

E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

收稿日期: 2005-12-21; 收到修改稿日期: 2006-06-29

的系统在水下目标的探测中已有应用^[5]。

产生携带有稳定无线电载波频率的激光束是实现光载波激光雷达系统的一个关键技术,其产生的方法有多种,譬如用两个稳定度极高的种子光注入到一个放大腔里^[6],或者利用激光谐振腔里双路径的两个相邻模式间产生的拍频^[7],也有直接使用两个纵模的^[8],但是拍频的实现难度都比较大。本文中,将高稳定度的单块非平面环形腔激光器的出射光分为两束,在其中一束光的光路中加入声光调制器改变其频率,然后再进行合光,产生 100 MHz 频差的拍频激光进行目标位移的测量。

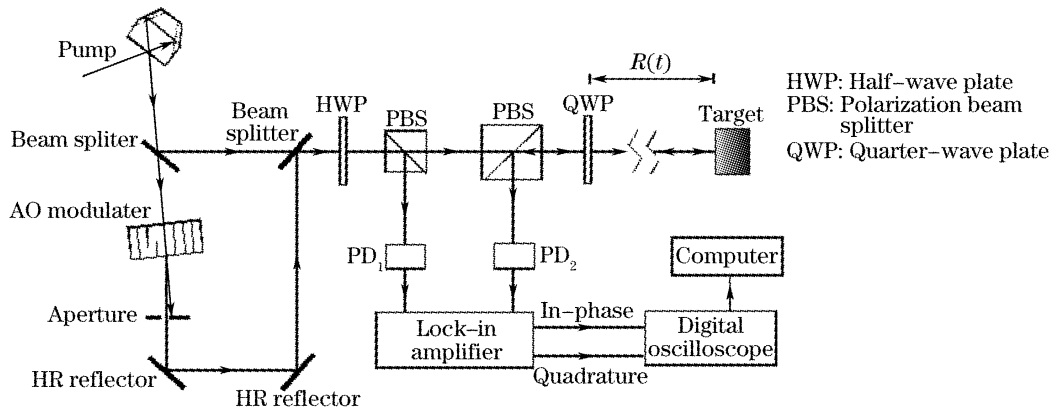


图 1 位移探测的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of displacement detection

设频率相差很小的两束光波瞬时频率分别为 $\nu_1(t)$ 及 $\nu_2(t)$, 其光场分别为

$$\begin{aligned} E_1(\nu_1) &= A_{c1} \cos(2\pi\nu_1 t), \\ E_2(\nu_2) &= A_{c2} \cos(2\pi\nu_2 t), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $A_{c1}(t)$ 、 $A_{c2}(t)$ 为两光波的振幅,当这两束光传播方向平行且重合入射到光电探测器上时,其输出的合成振动正比于光强,输出的光电流为

$$\begin{aligned} i_p \approx I = E^2(t) &= [E_1(\nu_1) + E_1(\nu_2)]^2 = \\ &= A_{c1}^2 \cos^2(2\pi\nu_1 t) + A_{c2}^2 \cos^2(2\pi\nu_2 t) + \\ &+ A_{c1}A_{c2} \cos[2\pi(\nu_1 + \nu_2)t] + \\ &+ A_{c1}A_{c2} \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t]. \end{aligned} \quad (2)$$

由于光电探测器存在探测频率上限,若当差频

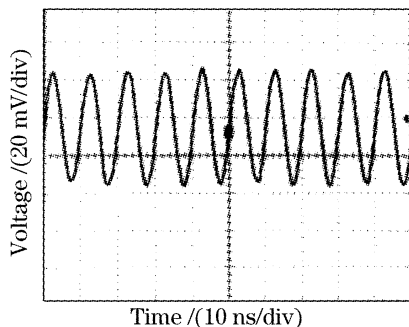


图 2 合成的参考信号

Fig. 2 Synthetic reference signal

2 双频激光位移测量系统基本原理

2.1 拍频信号源部分

整个双频激光测量系统如图 1 所示,由激光二极管抽运的单块非平面环形腔固体激光器^[9]输出的频率稳定度很高(线宽约 2 kHz/5 μ s)的单频激光束先由分束器分为两束,其中一束经过一个声光调制器,声光调制器的驱动电源为 100 MHz 的高频功率信号源,所得到的一级衍射光再与未频移的激光束在第二个分束器处合束,即进行光学混频,所得 100 MHz 的差(拍)频信号处于无线信号波段内。

信号低于光电探测器的截止频率时,即有拍频光电流输出为

$$i_p = A_{c1}A_{c2} \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t], \quad (3)$$

图 2 所示的是由示波器测得的光电探测器响应后的 100 MHz 拍频信号。

2.2 光路部分

测量部分由格兰棱镜和探测器组成,拍频信号源产生的双频激光通过二分之一波片后由格兰棱镜分为两束,二分之一波片的作用是调整偏振光在两个光路中的分光比。分出的一路偏振光由高速光电探测器响应,产生本振(参考)信号;与其正交的偏振光通过另外一个格兰棱镜出射,照射到目标物体(固定在电动导轨上的反射镜)上,探测光束往返通过一个四分之一波片后偏振方向改变 90°,再输出到第二个高速光电探测器,产生包含目标距离信息的探测信号。使用格兰棱镜配合四分之一波片接收信号光是激光雷达技术中常用的回波信号接收方法,可以利用回波信号激光的偏振态与本振光正交偏振方向的不同使本振信号与探测信号相隔离,避免其光路上的相互影响。

2.3 信号处理部分

信号处理部分是一个高频数字锁相放大器 (SR844, Stanford Research Systems), 工作在“External”模式下, 具有 25 kHz~200 MHz 的信号频率处理范围和 80 dB 的动态存储能力。锁相放大器的核心部分是精密相敏检波器, 在给定参考信号频率下, 能把极其微弱的同频率信号检测出来。其解算信号的基本原理是将输入信号和参考信号混频以后进行 I/Q 检波, 即正交解调运算, 得到同相(In-phase)信号分量和正交(Quadrature)信号分量, 然后可以得到输入信号幅值的大小以及相位信息。这些数值都可以由锁相放大器实时显示或者通过 RS232、GPIB 等接口方式输出。这种正交解调(Quadrature demodulation)数字信号处理方法在无线电雷达信号处理中已经广泛采用^[10]。在本装置中, 参考信号即是第一个光电探测器输出的本振信号, 输入信号是由目标物体反射镜返回光作用于第二个光电探测器输出的探测信号, 表达式分别为

$$V_r(t) = V_{r1} + V_{r2} + 2\sqrt{V_{r1}V_{r2}}\sin(2\pi f_{rf}t), \quad (3)$$

$$V_s(t) = V_{s1} + V_{s2} +$$

$$2\sqrt{V_{s1}V_{s2}}\sin\left[2\pi f_{rf}t + 4\pi\frac{R(t)}{\Lambda}\right], \quad (4)$$

其中 f_{rf} 为拍频, V_{r1} 、 V_{r2} (V_{s1} 、 V_{s2}) 分别是第一(二)个光电探测器上两个频率的光分量产生的相应输出的电压, $\Lambda = c/f_{rf}$ 是拍频信号的波长, $4\pi\frac{R(t)}{\Lambda}$ 是参考信号与输入信号的相位差[设为 $\varphi(t)$], $R(t)$ 是信号光束与参考光束的光程差, 包含了被测目标的距离信息。由于拍频为 100 MHz, $\Lambda = 3$ m, 当 $\varphi(t)$ 从 0 变化到 2π 时, 对应的 $R(t)$ 由 0 变化到 1.5 m, 因此该测量系统能够确定的位移不模糊极限范围为 1.5 m, 若要测量距离大于 1.5 m 的目标, 需要采用双拍频波长测距的方法, 这种扩展极限距离测量的方法也是来自于无线电连续波雷达测距的思想^[11], 不过这里的探测波长本身已经是一个拍频波长。两次设定拍频波长 Λ_1 和 Λ_2 , 设目标距离是 L , 则需要解联立方程:

$$L = N\Lambda_1 + n_1\Lambda_1 = N\Lambda_1 + \frac{\varphi_1}{4\pi}\Lambda_1, \quad (5)$$

$$L = N\Lambda_2 + n_2\Lambda_2 = N\Lambda_2 + \frac{\varphi_2}{4\pi}\Lambda_2, \quad (6)$$

其中 N 是正整数, 得到

$$N = (n_1\Lambda_1 - n_2\Lambda_2)/(\Lambda_2 - \Lambda_1), \quad (7)$$

$$L = \Lambda_1\Lambda_2(n_1 - n_2)/(\Lambda_2 - \Lambda_1), \quad (8)$$

为了不超出测量范围, 要求

$$L < \Lambda_1\Lambda_2/(\Lambda_2 - \Lambda_1), \quad (9)$$

例如: 选择拍频 $f_{rf1} = 100$ MHz, 则 $\Lambda_1 = 3$ m, 再微调拍频差, 使 $f_{rf2} = 99.9$ MHz, 则 $\Lambda_2 = 3.003$ m, 因此就可以测量 $\Lambda = 3003$ m ≈ 3 km 内的目标。这种测量方法对频率稳定性要求很高, 而且要求变换拍频波长期间目标静止。

3 测量结果

实验中用一个固定于电动导轨上的反射镜作为探测目标, 其运动由步进电机控制。探测目标在 20 cm 的范围内往复运动, 由锁相放大器解算出输入信号与参考信号的相位差 $\varphi = 4\pi\frac{R(t)}{\Lambda}$ 。目标移动时, $\Delta\varphi(t)$ 随 $\Delta R(t)$ 改变, 这样就可以计算出目标位移量, 利用位移对时间微商就得到了目标运动的速度。我们用 Visual Basic 语言编制了一个显示目标位移及其速度的程序, 计算机与锁相放大器采用 RS232 接口相连, 当目标开始往复运动时程序开始做数据采集, 采集速率为 100 样点每秒, 锁相放大器的滤波时间常量设为 30 ms, 仪器得到的相位数据有效位可以精确到 0.1° , 对应的位移分辨力可以达到 0.4 mm。图 3 是位移及速度的实时变化情况。从测量曲线可以清楚地看出, 当目标运动到起始点和折返点中间时基本上是匀速运动, 而到达折返点返回时运动速度为零, 对称性很好。根据获得的数据, 测量目标往复 5 次得到系统位移量的重复性误差小于 3%。但是, 由于 100 MHz 拍频信号是采用声光移频再合束的方法获得的, 合束以后两路光束的重合精确程度直接影响了系统的准确性, 因此提高作用距离的最好方法就是采用双频激光器谐振腔产生

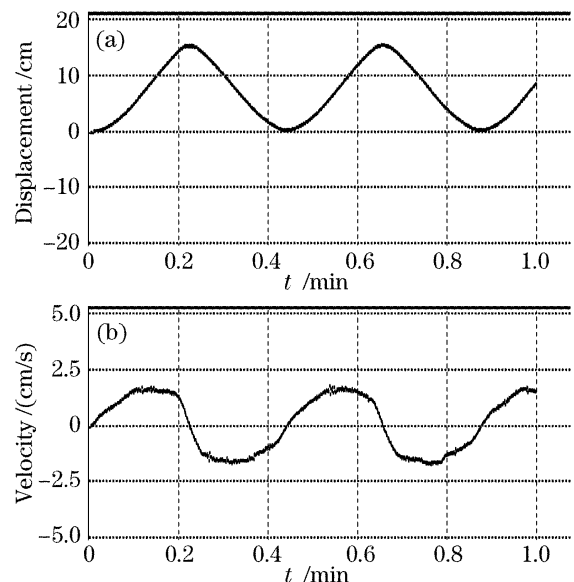


图 3 位移与速度曲线

Fig. 3 Displacement and velocity measurements

同一束高稳定性激光的拍频来完成测量。

实验中发现测量系统的高频响应特性很好,因此该系统可以作为测振仪使用,光路调整也没有激光干涉类仪器装置复杂。如果系统相位分辨能力得到保证,拍频波长越短则位移测量的精度越高,采用微片腔结构的双频激光器频差可以做到几十吉赫^[12]甚至更高,这样测振仪精度就可以达到微米量级。

对于长距离应用,需要采用长拍频波长或者如前所述多拍频波长测距的方法,这在外层空间诸如卫星测距之类的应用需求中有着良好的发展前景。但是在大气层内的长距离测量,由于激光在大气中传输衰减快,连续波拍频激光雷达系统在远距离应用时并没有优势,往往需要采取脉冲测距的方法,为了同时实现多普勒频移测速,需要采用脉冲拍频激光雷达。L. Morvan 等^[13]用双频激光脉冲测量 30 m 处的目标反射物,双频间隔从 0.1~20 GHz 可调,信号处理后得到的回波功率半峰全宽为 17 cm。由于拍频激光雷达是利用两个在光学频率上相差极微的光波频率的拍来完成测量的,差拍的波长在厘米至米的波长范围内,两个频率受各种干扰的影响是同相的,因此不管是连续还是脉冲工作方式,与传统的激光雷达相比,其合成拍频相位抗大气扰动的能力要强得多,这是拍频激光雷达的一个显著特点。

4 结 论

在本电外差激光位移测量装置中,系统的测量准确性和稳定性还需进一步提高,这是由于系统光路调节的精确性和复杂性的影响,但是演示系统的良好重复性证实了这种新型光载波激光雷达系统的可行性。我们正在研制高稳定性高光束质量激光二极管抽运的 Nd:YAG 双频固体激光器,利用其产生的位于同一束高斯光束内的双频间隔可调的拍频信号作为测量光源,并对激光器的拍频载波相位噪声做有效控制,期望可以较好地提高系统的性能。激光雷达和无线电雷达同为电磁波目标探测技术,可以从无线电雷达探测方式中得到很多有益的借鉴,比如连续波频率调制技术^[14],光学工作者借鉴这种调制方式取得了许多成果^[15,16]。作为光载波激光雷达技术,如何从微波雷达已有的成熟技术中吸取有益的思想,结合激光探测的固有特点取长补短,还有很多具体的技术需要研究。

参 考 文 献

- 1 Albert V. Jelalian. *Laser Radar Systems* [M]. Boston Mass.: Artech House, 1992
- 2 Merrill Skolnik. *Radar Handbook* [M]. 2nd ed., New York: Mac Graw Hill, 1990
- 3 Christer J. Karlsson, Fredrik A. Olsson, Dietmar Letalick *et al.*. All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μm for range, speed, vibration, and wind measurements[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(21): 3716~3726
- 4 Loïc Morvan, Ngoc D. Lai, Daniel Dolfi *et al.*. Building blocks for a two-frequency laser lidar-radar: a preliminary study[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5702~5712
- 5 Linda Jeanne Mullen, Amarildo J. C. Vieira, Peter R. Herczfeld *et al.*. Application of radar technology to aerial LIDAR systems for enhancement of shallow underwater target detection [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1995, **43**(9): 2370~2377
- 6 T. D. Raymond, A. V. Smith. Two-frequency injection-seeded Nd:YAG laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **31**(10): 1734~1737
- 7 M. Brunel, F. Bretenaker, A. Le Floch. Tunable optical microwave source using spatially resolved eigenstates[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(6): 384~386
- 8 Zhou Zhaofei, Zhang Tao, Zhou Weidong *et al.*. Profilometer for measuring superfine surfaces [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(8): 1646~1652
- 9 Wu Keying, Wei Guanghui, Zhao Changming *et al.*. Design of diode pumped unidirectional nonplanar single-frequency ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1245~1250 (in Chinese)
吴克瑛,魏光辉,赵长明等. 激光二极管抽运非平面单向行波环形腔单频固体激光器的设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1245~1250
- 10 Qiu Zhaokun, Ma Yun, Chen Zengping. Application of DDC chip in radar quadrature demodulation receiver[J]. *Modern Radar*, 2004, **26**(10): 44~47 (in Chinese)
邱兆坤,马 云,陈曾平. DDC 在正交雷达接收机中的应用[J]. *现代雷达*, 2004, **26**(10): 44~47
- 11 Shen Guowei, Fei Yuanchun, Guo Dechun. MFCW ranging technology and the method of ambiguity resolution [J]. *Modern Radar*, 2004, **26**(2): 35~36 (in Chinese)
沈国伟,费元春,郭德淳. 多频连续波测距及其解模糊[J]. *现代雷达*, 2004, **26**(2): 35~36
- 12 Marc Brunel, Axelle Amon, Marc Vallet. Dual-polarization microchip laser at 1.53 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(18): 2418~2420
- 13 L. Morvan, M. Alouini, A. Grisard *et al.*. Two optronic identification techniques: lidar-radar and multispectral polarimetric imaging[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5613**: 76~81
- 14 Chen Zhuming, Ding Yiyuan, Xiang Jingcheng. The effects of nonlinearity in frequency sweep on the range precision and range resolution of LFM CW radar [J]. *Acta Electron. Sinica*, 1999, **27**(9): 103~104 (in Chinese)
陈祝明,丁义元,向敬成. 扫频非线性对线性调频连续波雷达测距精度和分辨力的影响[J]. *电子学报*, 1999, **27**(9): 103~104
- 15 Christer J. Karlsson, Fredrik A. Olsson. Linearization of the frequency sweep of a frequency-modulated continuous-wave semiconductor laser radar and the resulting ranging performance[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(15): 3376~3386
- 16 Jesse Zheng. Coherence analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(16): 3681~3687