

文章编号: 1001-3806(2006)06-0564-03

激光多普勒调制器的优化

冯巍巍¹, 刘增东², 刘美娟¹, 史丰荣¹, 张 骏¹, 江荣熙^{1*}

(1. 烟台大学 光电信息科学技术学院, 烟台 264005; 2 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 为了提高激光多普勒调制器调制频率的稳定度, 通过从光学、机械、电子学等方面的优化, 对影响多普勒调制器的各种因素进行了深入的研究。实验结果表明, 经过优化后的多普勒调制器的输出调制信号频率的相对标准误差达到了 1% 左右, 能够满足锁相放大器对输入参考信号频率稳定度的要求。

关键词: 激光技术; 多普勒调制器; 频率稳定度; 优化

中图分类号: O438 文献标识码: A

Improvement on laser Doppler modulator

FENG Wei-wei¹, LIU Zeng-dong², LIU Mei-juan¹, SHI Feng-rong¹, ZHANG Jun¹, JIANG Rong-xi¹

(1. Institute of Science and Technology for Opto-electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China; 2 Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, the Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract In order to improve the frequency stabilization of the Doppler modulator, a series of affecting factors are considered in depth and optimized in the aspects of optics, mechanics and electronics. The experiment results show that the frequency stabilization of the optimized Doppler modulator has already reached RMS error about $\pm 1\%$, which could meet the need of reference signal of the lock-in amplifier.

Key words laser technique; Doppler modulator; stabilization of frequency; improvement

引 言

随着科学技术的发展, 激光技术已经在现代工程、军事、生物和医药等领域得到广泛的应用。尤其在军事上, 激光技术在精确制导、预警、目标识别等方面的应用潜力日益受到关注。激光多普勒技术是激光技术应用中的一个重要部分, 国内关于激光多普勒的报道, 大多是关于激光多普勒测速^[1]、测振^[2]方面, 把激光多普勒技术作为调制技术, 虽然国外在上世纪 90 年代初有过相关报道^[3-5], 但到目前为止, 国内在这一领域还属空白。主要原因在于利用多普勒信号作为调制信号对参考光束和信号光束空间准直的要求远远超过利用多普勒效应测速时对光束空间准直的要求, 更为重要的是, 把多普勒信号作为锁相探测技术的调制信号需要较长时间的频率稳定性, 就对系统整体提出了十分苛刻的要求。作者在前期研究工作的基础上^[6,7], 对实验装置进行了光学、机械、电子学等方面的优化, 使得频率稳定度大幅提高, 明显优于改进前的测试结果, 能够满足弱信号探测中锁相放大器对参考信号频

率稳定度的要求。

1 总体优化及其分解

动态多普勒调制技术属于相干检测技术, 也有称为光混频技术^[8]或频率调制技术^[9]的。所以, 动态多普勒调制技术受相干探测的空间条件和频率条件的限制。在理想的相干探测中, 信号光束和参考光束平行入射, 在探测器视轴方向的一定范围内形成干涉场。而实际探测要受到外界多方面的影响, 例如: 大气的扰动, 激光器强度的起伏, 传动平台运动时的左右摇摆和上下颠簸等都会引起干涉场的变化, 直接引起探测信号发生变化(幅值的起伏和频率的不稳定)。此外, 探测器供电电源的稳定性, 放大和滤波电路的设计, 仪器间的阻抗匹配等一系列光学、机械、电子学等方面的因素都会对总体探测技术产生影响, 因此, 优化必须从光学、机械、电子学方面进行改善。

1.1 光学优化

根据相干检测的基本原理^[8], 信号光和参考光在一定范围形成干涉场, 合振幅 E 可以表示为:

$$E = [e_s(t) + e_r(t)]^2 = [A_s^2 \cos^2(\omega_s t + \varphi_s) + A_r^2 \times \cos^2(\omega_r t + \varphi_r)] + A_s A_r \cos[(\omega_r + \omega_s)t + (\varphi_r + \varphi_s)] + A_s A_r \cos[(\omega_r - \omega_s)t + (\varphi_r - \varphi_s)] \quad (1)$$

式中, $e_s(t) = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s)$, $e_r(t) = A_r \cos(\omega_r t + \varphi_r)$,

作者简介: 冯巍巍(1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电信息获取与处理技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jrx@mail.edu.cn

收稿日期: 2005-10-28 收到修改稿日期: 2006-04-25

$e_s(t)$ 代表待测信号光的光强, $e_r(t)$ 代表参考光的光强; A_s 和 φ_s 分别为信号光振幅和位相, A_r 和 φ_r 分别为参考光的振幅和位相。其中 $\cos^2(\omega_s t + \varphi_s)$ 和 $\cos^2(\omega_s t + \varphi_r)$ 及 $\cos[(\omega_s t + \omega_r) t + (\varphi_s + \varphi_r)]$ 3 项由于是光波电磁场自身频率或它们的和频, 超过了光电探测器响应频率, 不能响应。而 $\cos[(\omega_s - \omega_r) t + (\varphi_s - \varphi_r)]$ 项只要差频 $(\omega_s - \omega_r) = \omega$ 小于探测器的截止频率, 探测器就能够响应, 根据 (1) 式, 探测器点电流 $I(t)$ 可以表示为:

$$I(t) = D \left\{ \frac{A_s + A_r}{2} + A_s A_r \cos[\omega t + (\varphi_s - \varphi_r)] \right\} \quad (2)$$

式中, D 为平方率探测器相对于输入光强与输出电流之间的比例常数, 第 1 项是直流分量, 它并不携带有用信息, 可用隔直电容滤除; 第 2 项是交流成分, 恰好包含了所关心的多普勒频移量, 滤除直流分量后, 上式就变为:

$$I(t) = D A_s A_r \cos[\omega t + (\varphi_s - \varphi_r)] \quad (3)$$

(3) 式是在理想情况下推导的, 即参考光和信号光平行, 初始位相差恒定的前提下。而在动态多普勒调制实验中, 要保持多普勒信号有最大的、稳定的幅值输出, 就要求信号光和参考光束的波前必须平行, 也就是说, 在运动过程中始终保持信号光和参考光在空间上的角准直, 这对一个动态的光学相干检测系统来说是比较困难的。在 (3) 式中输出信号的初始位相差 $(\varphi_s - \varphi_r)$, 对实验系统来说它是一个常量。由 (3) 式也可以看出, 影响最终的多普勒信号频率稳定的因素主要有两个, 一是传动平台运动速度的稳定性, 它将直接影响差频 $\omega = \omega_s - \omega_r$, 第 2 个就是信号光和参考光在空间传播方向发生的变化, 即信号光和参考光夹角变化时, 将使干涉场发生变化, 不仅干涉条纹疏密发生变化, 而且条纹在空间上也要发生方向偏转。当条纹变密时, 如果通光孔径大于一个条纹的宽度, 由于接收系统的孔径平滑效应会大大影响输出信号的调制度。在这种情况下, 想要保持信号的调制度不发生变化, 只有缩小接收系统的通光孔径来保持调制度, 但这将导致总的光强输入的下降。这就失去了本项研究的初衷。所以要保持信号光和参考光在传动平台运动的一定范围内完全平行, 光学优化就是为了确保这一目的。系统优化前后参考光路的干涉条纹的对比如图 1 所示。

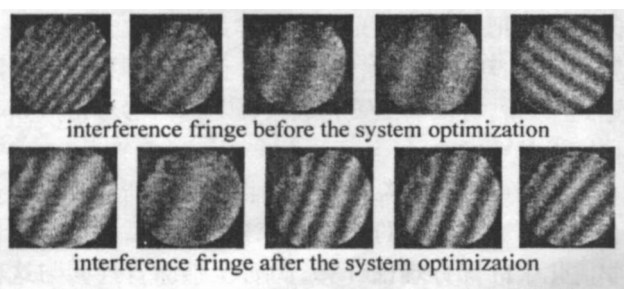


Fig 1 Interference fringe comparison before and after system optimization

在国外的同类报道中^[10], 实验采用光学平面镜作为联动参考反射镜。然而以平面镜作为联动参考反射镜, 传动平台轻微地摇摆所引起平面镜的抖动 (如图 2 所示), 就会使信号光的传播方向发生两倍的变化, 结果是条纹疏密和方向都会发生急剧变化, 引起信号幅值不稳。如果要求平面镜在传动平台上移动时, 所反射的信号光的空间传播方向不发生变化, 则对传动平

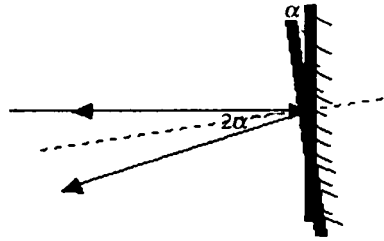


Fig 2 Flat mirror

台直线性提出极高的要求, 对现在的工艺而言, 很难达到这一要求。实验证明, 采用直角棱镜能够很好地解决这一问题。通过直角棱镜的出射光始终与一定方向的入射光逆向平行, 即这种反射装置对自身的偏摆不灵敏 (见图 3), 因此, 对传动平台的直线性的要求大为

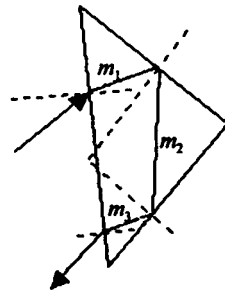


Fig 3 Orthogonal prism

降低。有关的几何推导, 这里就不给出详细步骤, 只给出结论, 见下式:

$$m_1 + m_2 + m_3 = \sqrt{2}Ln / \sin(90^\circ + i) \quad (4)$$

式中, n 为直角棱镜的折射率, L 为直角棱镜的直角边长, i 为入射角的折射角, m_1, m_2, m_3 所对应的入射光束在直角棱镜中的所走路程对应的线段如图 2 所示。而理想的正入射时, $m_1 + m_2 + m_3 = \sqrt{2}Ln$ 。由于传动平台所引起的光程差 $\Delta l = \sqrt{2}Ln / \sin(90^\circ + i) - \sqrt{2}Ln$, 当入射光波为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的氦氖激光时, 通过计算, 直角棱镜的偏摆 0.2° 时才造成一个波长的光程差变化, 给信号的位相造成起伏, 对相位能够自动补偿的锁相放大器来说, 看不出对信号探测的影响, 从而保证接收系统接受到稳定的光电信号。

1.2 机械学方面的优化

在实验初期, 采用的传动平台是上海机械学院附属工厂制造的 ZJ087 精密长平移台。此传动平台采用精密滚珠导轨, 其标称精度和传动稳定性应该能够满足本实验的要求。但在实际实验过程中, 得到的实

验数据和实验结果充分说明了此平移台运动极不平稳,出现了肉眼可观察到的“左右颤动”和“瞬间停滞”现象。从实验数据绘制的实验波形中(见图4),可以

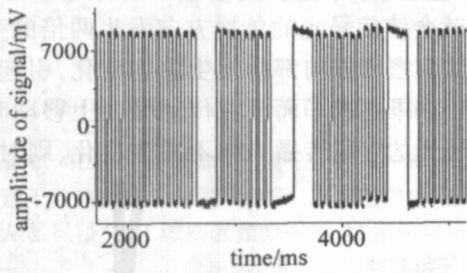


Fig 4 The signal waveform before optimization

清楚地看出,由于平移台运动过程中的不匀速性,造成激光多普勒频移信号的剧烈波动。在平移台往返运动的过程中,调制频率的起伏波动贯穿始终。这就使得参考通道几乎无法在锁相放大器的一定时间常数范围内进行工作。

采用滚珠丝杠代替滚珠导轨来克服原导轨的直线性和稳定度的问题,从实验结果来看,当采用减速比传动,使驱动器处于全功率状态,能够获得平稳的传动速度,确保了调制频率稳定性。传动平台的直线性和稳定度方面得到明显的改善,优化后的信号频率稳定度可以达到标准误差约 $\pm 1\%$ 左右(见图5)。

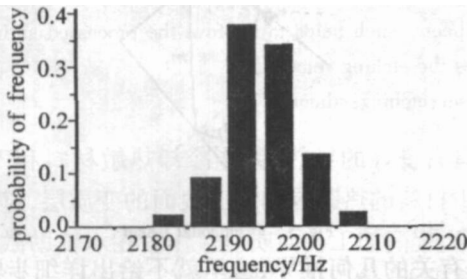


Fig 5 Probability histogram of the Doppler signal frequency

1.3 电子学方面的改善

通过光学和机械方面的优化,信号光束和参考光束的空间准直性以及传动平台运动的匀速性都得到了保证,但由于传动平台的控制是通过EPP接口利用VISUAL C++ 6.0编程来控制的,实验初期直接利用VISUAL C++ 6.0软件系统所默认的1ms的极限时钟频率,这样低的时钟频率,是不能满足精确定位的要求。这种始末位置的不可重复性,为后来的数据处理,寻找规律性造成了困难。经过传动平台控制程序的优化,直接调用电脑内部时钟(有效可利用频率在微秒级),使得传动平台的精确定位得到了极大改进,如图6所示,始末位置信号幅值的起伏主要是由于传动平台在换向时干扰造成。

为了探测到微弱的光信号,接收系统主要是由光电倍增管组成,光电倍增管所提供的光电信号作为参考信号输入到锁相放大器。锁相放大器的参考通道的

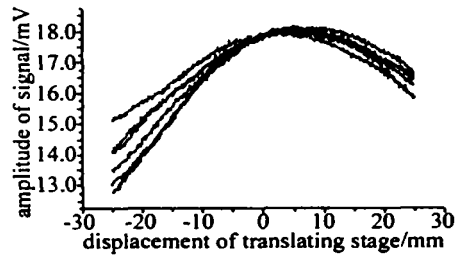


Fig 6 Amplitude of the Doppler signal versus displacement

输入信号的峰峰值必须大于100mV,因为通过光电倍增管输出的多普勒信号的幅值往往小于100mV,所以参考信号在输入到锁相放大器参考通道前要进行放大和整形,值得提出的是,由于光电倍增管输出的光电信号直流漂移的影响以及放大电路供电电源受市电的影响,使得整形后的多普勒信号波形出现不规则的拉宽现象,如图4所示。为了解决这一问题,放大电路采用直流电池供电,同时把光电倍增管输出的光电信号在输入到放大电路前进行隔直和滤波处理。经上述改进后,整形的多普勒调制信号的不规则拉宽现象终于得到了解决,如图7所示。

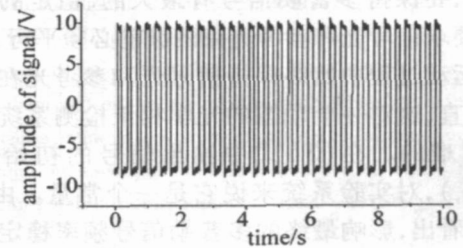


Fig 7 The signal waveform after the optimization

除了上述两个主要的改进外,也进行了重新配置步进电动机的驱动器和控制器,以及采用光电耦合器代替机械换向开关,解决了放大电路和仪器间的阻抗匹配等问题,虽然这些问题看来不是主要问题,但在整个系统优化方面起到重要的作用。从实验获取的实验波形中(见图7)可以看出,波形规整,频率间隔均匀,虽然仍有高频噪声的存在,但信噪比已经非常高,能够满足锁相放大器对输入参考信号频率稳定要求的需要。

2 结论

通过对动态多普勒调制器进行“光、机、电”3个方面优化,与优化前实验结果相比取得了令人较为满意的效果。把优化后的光电信号作为锁相放大器的输入参考信号,对理想样品进行测试,信号频率稳定度可以达到 $\pm 1\%$,可以满足锁相放大器对输入参考信号频率稳定性的要求。

感谢中国科学院上海技术物理研究所亓洪兴博士在前期研究工作中的开创性探索,及伊厚会博士在光学优化中的部分理论计算,同时也感谢曾经参与这项

(下转第569页)

频率的条件下水和空气中激光刻蚀硅的深度对比。从图中可知,水辅助激光刻蚀速率比空气中激光直刻速率也要快。而且,在水和空气中两种情况下激光刻蚀硅,由于每个实验点的脉冲个数相等,刻蚀的深度基本相同,且随脉冲频率的增加而略有减小。

实验结果表明,在不同脉冲个数和脉冲频率的条件下,水辅助激光刻蚀速率总是比空气中激光直刻的刻蚀速率大。这是因为,当高功率激光作用于靶材时,材料表面出现融蚀,产生高温高压等离子体等现象。该等离子体吸收后续激光能量向外膨胀,将对材料表面形成反冲压力。由物理学可知,激光和物质作用,如果在材料表面上覆盖有对激光透明的物质,如水、石英等,周围介质在一定程度上限制了刻蚀过程中材料微粒从刻蚀孔向外喷出,这增加了刻蚀过程中产生的冲击作用,使激光脉冲对材料的刻蚀作用增强。当为液体时,还会出现空泡这一物理现象。如果空泡周围存在固体壁面,那么在溃灭阶段还会形成指向靶面的高速射流。该高速射流所产生的冲击力往往可达到兆帕的数量级^[9,10]。因此,高能量密度激光通过水作用在材料表面时,会产生比在空气中更强的冲击作用,使微加工的速率加大。但是,冲击作用增大也可能使得刻蚀材料背面易出现材料崩离。

3 结 论

与准分子激光直刻硅工艺相比,水辅助准分子激光微刻蚀硅工艺,具有刻蚀表面质量好、刻蚀速率快、对环境无污染,无需掩模就能进行图形加工,工艺过程

简单。该工艺不仅具有加工大深宽比微结构的能力,而且对硅片的抛光面也有良好的刻蚀性能。

参 考 文 献

- [1] CHOO K L, OGAWA Y, KANBARG I G *et al* M icrom achining of silicon by short-pulse laser ablation in air and under water [J]. *Materials Science and Engineering* 2004 A372(1~2): 145~ 162.
 - [2] DAM NELLIG, KRUGER J KAUTEK W. Femtosecond laser interaction with silicon under water confinement [J]. *Thin Solid Films* 2004 467(1~2): 334~ 341.
 - [3] SHAFEEV G A, OBRAZISOVA E D, PM ENOV S M. Laser-assisted etching of diamonds in air and in liquid media [J]. *Materials Science and Engineering* 1997 B46(1~3): 129~ 132.
 - [4] LI Y W, LIU J Zh, LI W X. Study of CO₂ laser grooving under water on the outside of a cylinder casing [J]. *Chinese Journal of Lasers* 1999 26(5): 455~ 460(in Chinese).
 - [5] LING L, LOU Q H, LI Sh Zh *et al* M icrocutting Si wafer in water bath by second harmonic output of YAG laser [J]. *Laser Technology* 2004 28(2): 131~ 133(in Chinese).
 - [6] LIU H P, ZHOU Y H, XIONG J C *et al* Experimental study on transverse affect zone in external laser direct etching [J]. *Laser Technology* 2005 29(2): 132~ 134(in Chinese).
 - [7] KRUSUNG A. Underwater and water-assisted laser processing part 2— etching, cutting and rarely used methods [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2004, 41(2): 329~ 352.
 - [8] KRUSUNG A. Underwater and water-assisted laser processing part 1— general features, steam cleaning and shock processing [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2004 41(2): 307~ 327.
 - [9] XU R Q, CHEN X, SHEN Zh H. Anom al phenomenon of laser drilling a plate underwater [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics* 2004 18(2): 130~ 134(in Chinese).
 - [10] CHEN X, XU R Q, SHEN Zh H *et al* M echanisms of laser processing in water and air [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology* 2004 28(3): 248~ 252(in Chinese).
-
- (上接第 566 页)
- 工作的青心老师和杨尚明老师在理论与实践方面给予的宝贵指导。
- 参 考 文 献
- [1] YANG A, ZHONG D J The study of a compact laser diode Doppler interference system [J]. *Laser Technology*, 1994, 18(4): 202~ 206(in Chinese).
 - [2] LU H Sh, LU B. Latest development of laser Doppler technique in vibration measurement [J]. *Laser Technology*, 2005 29(2): 176~ 179(in Chinese).
 - [3] GU Z H, LIN Z Q. Design review of a unique laser monostatic bidirectional reflectometer [J]. *Proc SPIE*, 1993, 1995 131~ 142.
 - [4] GU Z H, LIN Z Q, ESTEP J A. Calculation of signal-to-noise ratio of a monostatic bidirectional laser reflectometer [J]. *Proc SPIE*, 1993 1753 292~ 303.
 - [5] ESTEP J A, GU Z H. Ladar signature simulation [J]. *Proc SPIE*, 1992 1700 119~ 128.
 - [6] QI H X, LIU Z D, JIANG R X. A Doppler modulation based upon Michelson-Morley dynamic interferometer [J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2003 16(4): 248~ 251(in Chinese).
 - [7] LU Z D, FENG W W, LIU M J. New type of Doppler modulating technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 556~ 559(in Chinese).
 - [8] YANG G G. Modern technology for optical examination [M]. Hangzhou Zhejiang University Press 1997 430~ 433(in Chinese).
 - [9] HU Sh L. Laser interference technology for velocity measurement [M]. Beijing National Defence Industry Press 2001 9~ 11(in Chinese).
 - [10] GU Z H, DUMMER R S. Small angle scattering measurement [J]. *Proc SPIE*, 1991 1558 374~ 375.