

一种新型的多普勒调制技术*

刘增东,冯巍巍,刘美娟,张骏,江荣熙

(烟台大学光电信息科学技术学院,山东烟台264005)

摘要:在传统的斩波器调制技术中,被测对象“被动”地接受外来调制光的照射,由于这种照射一般要经过一定的光学系统来完成,因此,调制照射发生在每一个光束经过的光学元件上,这些元件必定会存在某些加工缺陷,从而产生与调制照射同频率、固定位相差的杂散信号,只要这些信号在探测器的视场里,就会形成背景干扰,从而降低信噪比。利用 Michelson-Morley 动态干涉技术,建立了一套基于 Doppler 频移原理的调制器。与传统的调制技术相比,多普勒调制技术是将被测目标自身运动产生的多普勒频移在干涉仪光路中造成的干涉场的交替变化作为调制频率来实现光的调制,可以有效地消除目标以外一切背景因光调制而产生的噪声影响,极大地改善微弱信号探测的信噪比。实验结果表明:调制信号频率稳定度(相对标准差)可达到 $\pm 1\%$ 左右,能满足锁相放大器参考信号的需要。

关键词:动态干涉;多普勒频移;多普勒调制器

中图分类号:O43 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)05-0556-04

New type of Doppler modulating technology*

LIU Zeng-dong, FENG Wei-wei, LIU Mei-juan, ZHANG Jun, JIANG Rong-xi

(Institute of Science and Technology for Opto-Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: In the traditional modulating technology, the objects are illuminated by the modulated laser beams. In general, this kind of illumination must pass through some optics systems. The modulating illumination occurs at every optics component which the modulated laser beams pass through. These optics component must have some blemishes, which could produce the same frequency of the modulated laser beams and idle signals of stable phase. If these signals are in the field of view, they can produce background disturbance, so signal-to-noise becomes low. A new type of Doppler modulator which bases on Michelson-Morley dynamic interference technology is introduced. Compared with the traditional modulating technology, the Doppler modulating technology is that the Doppler shift of the sample's moving leads to alternating variation of coherent field, which is used as modulating frequency. It can decrease effectively the background noise from modulating except for the target. Stabilization of the signal frequency presented by this type of Doppler modulator is about 1%, which could satisfy the need of reference signal of the lock-in amplifier.

Key words: Dynamic interference technology; Doppler shift; Doppler modulator

收稿日期:2005-04-14; 修订日期:2005-06-22

* 基金项目:国防重点实验室基金资助项目(00JS66.5.2QT0701)

作者简介:刘增东(1979-),男,山东蓬莱人,硕士生,主要从事光电信息获取与处理技术的研究。

0 引言

在利用锁相放大器进行微弱光信号探测时,为了提高信噪比,一般采用斩波器作为光调制的手段。在传统的斩波器调制技术中,被测对象“被动”地接受外来调制光的照射,由于这种照射一般要通过一定的光学系统来完成,因此,调制照射发生在每一个光束经过的光学元件上,这些元件自身无论加工多么完善,都必定会存在某些缺陷(如玻璃中的气泡、条纹,反射面上的灰尘、划伤,胶合面的老化与剥落),导致产生与调制照射同频率,固定位相差的杂散信号,只要这些信号在探测器的视场里,就会形成背景干扰,降低信噪比。利用 Michelson-Morley 动态干涉技术建立的多普勒调制器,是通过被测目标自身运动产生的多普勒频移在干涉仪光路中造成的干涉场的交替变化作为调制频率来实现光的调制,有效地消除了光学元件和背景的影响,进一步提高了信噪比。值得注意的是,当被测目标所反射(散射)的测量信号低于背景噪声信号时,可以通过提高照射功率来提高信噪比^[1],传统的斩波器调制技术无法实现这一点,因为传统的调制方法是被动调制,虽然提高了照射功率,但信号与背景噪声有“水涨船亦高”的制约关系^[2-6]。为了叙述方便,在下文中把这种与多普勒频移相关的调制称为多普勒调制。

1 实验原理

基本实验原理如图 1 所示,图中:A 为激光器,B 为参考光束分束器,C 为空间滤波扩束器,D 为参考反射镜,E 为样品反射镜,F 为扩束激光束,G 为非扩束激光束,H 为极限分辨焦面系统,I 为参考探测器,

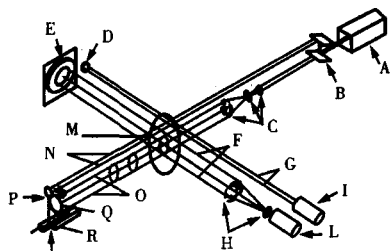


图 1 基本实验原理

Fig.1 Simplified schematic of basic experimental apparatus

L 为样品探测器,M 为中心分束器,N 为参考光束,O 为扩展光束,P 为联动参考反射镜,Q 为样品,R 为传动平台。激光器发射的光束被参考光束分束器分成两束,一束经空间滤波扩束器扩束成直径约 2.5 cm 的光束,另一束没有被扩束,将没有被扩束的激光束作为参考光束。参考光束经中心分束器后,一部分转向与传动平台运动方向成直角的参考臂的方向,经固定的参考反射镜反射,经中心分束器透射的参考光束经联动参考反射镜反射,被联动参考反射镜反射的光束和由参考反射镜反射的光束经中心分束器后,在探测器视轴方向的一定范围内形成干涉场,当传动平台前后运动时,就会使干涉场按一定的频率明暗变化,通过参考探测器就转换为以同样频率变化的光电信号。

根据多普勒频移原理^[7]:

$$\omega = 2\pi \left| \frac{\vec{V}}{\lambda} (\cos(\vec{K}_i, \vec{V}) - \cos(\vec{K}_s, \vec{V})) \right| \quad (1)$$

式中 λ 为入射光的波长; \vec{V} 为联动参考反射镜运动速度; \vec{K}_i 为入射到联动参考反射镜方向上的激光的传播矢量; \vec{K}_s 为反射光沿光轴方向的传播矢量,传动平台向中心分束器运动时, $(\vec{K}_i, \vec{V}) = 180^\circ, (\vec{K}_s, \vec{V}) = 0^\circ$, 反方向运动时, $(\vec{K}_i, \vec{V}) = 0^\circ, (\vec{K}_s, \vec{V}) = 180^\circ$ 。总之:

$$\left| \cos(\vec{K}_i, \vec{V}) - \cos(\vec{K}_s, \vec{V}) \right| = 2$$

即:

$$\omega = 2\pi \left| \frac{\vec{V}}{\lambda} (\cos(\vec{K}_i, \vec{V}) - \cos(\vec{K}_s, \vec{V})) \right| = 4\pi \frac{v}{\lambda} \quad (2)$$

从参考反射镜上反射回来的光的频率仍为 ω_0 。被联动参考反射镜和参考反射镜反射的光在参考探测器前的入射光瞳上形成干涉场,根据光电探测器的平方律特性,输出电流为:

$$I(t) = D \langle [e_s(t) + e_r(t)]^2 \rangle \quad (3)$$

式中 $\langle \rangle$ 为在几个光频周期上的时间平均; D 为参考探测器相对于输入光强与输出电流之间的比例常数。其中:

$$\begin{aligned} e_s(t) &= E_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \\ e_r(t) &= E_r \cos(\omega_r t + \varphi_r) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 E_s 和 φ_s 分别为被联动参考反射镜反射的调制

光的振幅和位相; E_r 和 φ_r 分别为参考臂上的参考反射镜反射的调制光的振幅和位相。

公式(3)中展开有四项,对应于四个频率成分。考虑到光电探测器的频率响应性,其中 $\langle \cos^2(\omega_s t + \varphi_s) \rangle$ 和 $\langle \cos^2(\omega_r t + \varphi_r) \rangle$ 及 $\langle \cos(\omega_s + \omega_r)t + (\varphi_s + \varphi_r) \rangle$ 三项由于是光波电磁场自身频率,超过了光电探测器响应频率,不能响应。而 $\langle \cos(\omega_s - \omega_r)t + (\varphi_s - \varphi_r) \rangle$ 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,因此公式(3)变为:

$$I(t) = D \{ (E_s + E_r) / 2 + E_s E_r^* \cos[\omega t + (\varphi_s + \varphi_r)] \}$$

上式的第一项是直流分量,它并不携带有用信号,基本不影响测试结果,可用隔直电容滤除;第二项是交流成分,恰好包含了我们所关心的多普勒频移量,滤除直流分量后,上式就变为:

$$I(t) = D E_s E_r \cos[\omega t + (\varphi_s - \varphi_r)] \quad (4)$$

由上式不难看出:光电探测器的最终输出只与运动物体的多普勒频移的频率和初始位相差有关,位相差只与参考反射镜和联动参考反射镜的相对位置有关。多普勒频移只能由相对运动的物体产生,与一切静止元件和背景无关,把这个频率作为调制频率,就能够区别于一切处于静止状态的光学元件和其他相关背景的杂散信号^[6]。

为了探测到微弱的激光散斑信号,采用锁相放大器,锁相放大器的参考通道的输入信号是由参考探测器提供的光电信号,其信号通道的输入信号是由样品探测器提供的光电信号。由于样品和联动参考反射镜一起平动,其光路和前面介绍的参考光路完全一样,所以样品探测器提供的光电信号可以表示为:

$$I'(t) = D' E'_s E'_r \cos[\omega' t + (\phi_s - \phi_r)] \quad (5)$$

式中 D' 为样品探测器相对于输入光强与输出电流之间的比例系数; E'_s 和 ϕ_s 分别为样品反射光的振幅和相位; E'_r 和 ϕ_r 分别为参考臂上的样品反射镜反射光的振幅和位相; ω' 为样品光路的多普勒频移。由于联动参考反射镜和样品固定在同一个传动平台上,它们运动产生的多普勒调制频率是相同的,即 $\omega' = \omega$ 。

根据锁相放大器的工作原理,把公式(5)所对应的光电信号作为参考信号输入锁相放大器的参考通

道;把公式(6)所对应的光电信号作为样品信号输入锁相放大器的信号通道,经混频器后的输出信号为:

$$V_0 = I(t)I'(t) = 0.5 \{ DD' E_s E_r E'_s E'_r \cos[(\omega' + \omega)t + (\varphi_s - \varphi_r + \phi_s - \phi_r)] + DD' E_s E_r E'_s E'_r \cos[(\omega' - \omega)t + (\varphi_s - \varphi_r - \phi_s + \phi_r)] \} \quad (6)$$

可见混频器输出由差频 $(\omega' - \omega)$ 项与和频 $(\omega' + \omega)$ 项两部分组成。因为 $\omega' = \omega$,则以低通滤波器组成的积分器取出差频分量而检测出信号。输出信号:

$$V_0 = K E_s E_r E'_s E'_r \cos \phi \quad (7)$$

式中 K 是与输入信号幅度和低通滤波器传递函数有关的常数; $\phi = \varphi_s - \varphi_r - \phi_s + \phi_r$, 此位相差由样品反射镜和参考反射镜的相对位置及联动反射镜和样品的相对位置决定。这两个相对位置是不变的,所以测量信号和参考信号的位相差也是不变的。由于与参考信号无固定的相位关系,非相位锁定信号混频后输出为零,从而实现了非相位锁定信号的抑制。

2 实验结果与分析

用锁相放大器进行微弱光信号探测时,锁相放大器只响应与参考信号同频及相位锁定的被测信号。锁相放大器的输出是一个直流量。如果锁相放大器能够“锁住”某一被测信号,其输出的直流量就是恒定的或在某一个值的附近做微小波动。通过判断输出直流量的稳定性,就可知道被测信号与输入信号的相对稳定性。数据采集是通过一台 Tektronix 公司的 TDS3052 数字存储示波器进行的。锁相放大器 (EG&G 公司的 5301) 通过 GPIB 接口和示波器相连。图 2 为光电倍增管输出信号经带通滤波电路滤除低频扰动和高频噪声后,再经放大整形电路后的方波波形图,由图看

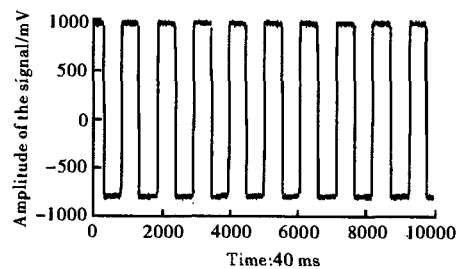


图 2 整形后输入信号的波形图

Fig.2 Wave of input transformed signal

出:波形比较方正,频率间隔均匀,虽然仍有高频噪声存在,但信噪比是非常高的。为了更好地了解系统频率的稳定性,采用自相关锁定技术(自相关锁定技术是把样品信号分流出一部分作为参考信号输入到锁相放大器的参考通道,这样参考信号和样品信号就具有相同的位相),得到多普勒信号的幅值和平移台的位移曲线如图 3 所示,多普勒信号频率的统计直方图如图 4 所示。

大量实验证明,测量光路自相关锁定的测量结果具有规律性和小弥散性。对应于传动平台导轨的某一小段区间,测量曲线几乎重叠。在传动平台从+5~-5 mm 这段重合区域内的标准偏差为 0.2 mV,其相对标准误差只有百分之一。由图 3 可以看出多普勒信号的幅值和平移台的位移具有良好的重复性。多普勒调制器频率的测量值的标准方差只有 5 Hz,可见频率的精度是非常高的,如果把这样的频率作为锁相放大器的参考频率是能够达到实验要求的。

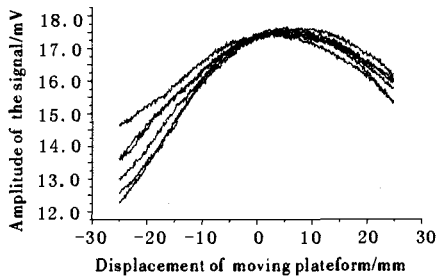


图 3 多普勒信号的幅值-位移的曲线图

Fig.3 Amplitude-displacement graph of the Doppler signal

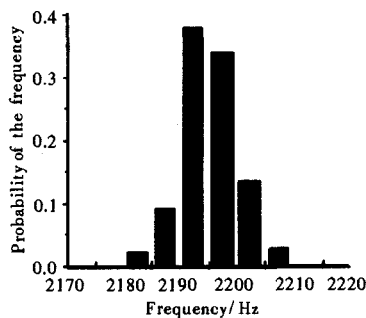


图 4 多普勒信号的频率统计直方图

Fig.4 Frequency carbon of the Doppler signal

如果不考虑大气的扰动和激光器的强度起伏,在图 3 中曲线两端的弥散度比较大的主要原因可能是由于传动平台换向时引起的抖动造成条纹间隔和形状改变,进而影响狭缝宽度与条纹间隔的比值。

根据公式(1)可以看出,多普勒频移量与被测目标移动的速度和激光的波长以及入射光线和反射光线的夹角的余弦值有关。动态干涉仪中的动镜在沿导轨移动过程中,误差主要由运动速度不稳定,即伺服电机转速的不恒定造成。多普勒频移量几乎与其他原因无关,所以系统有极好的频率稳定性。

表 1 实验数据的统计结果

Tab.1 Statistic result of experimental datum

Frequency/Hz	Frequency distribution	Relative standard deviation
2183	11	±1%
2188	45	
2193	190	
2198	171	
2200	68	
2210	14	

3 结论

在利用锁相放大器进行微弱信号检测时,需要频率稳定的参考信号,实验中对参考信号幅值的变化一般不作苛刻要求,所以这种调制器能够达到我们的实验要求。结果表明:调制信号频率稳定度可达到±1% (如表 1 所示),可满足锁相放大器参考信号的需要。

参考文献:

[1] ZHUO Yong-mo,BAO Zheng-kang.Coherent Measurement Equipment and Technology[M].Zhejiang:Publication of Zhejiang University(卓永模,包正康.相干计量仪器与技术.浙江:浙江大学出版社),1992.

[2] Gray M B,Stevenson A J,Bachor H A,et al.Broadband and tuned signal recycling with a simple Michelson interferometer[J].Applied Optics,1998, 37(25):5886-5893.

[3] WU Xin-min,CHEN Jin-bang,GAO Zhi-shan. Adaptive vibration-resistant techniques in interferometry[J].Infrared and Laser Engineering(吴新民,陈进榜,高志山.干涉测量中的自适应抗震技术.红外与激光工程),2001,30(4):292-296.

[4] ZHU Da-yong.Super long range Doppler laser radar[J].Infrared

(下转第 572 页)

60°, 探测器与太阳方位角之差 180°, 视场因子 0.9。

从仿真结果可以看出, 由于实测系统频率响应较低使得曲线变得十分平滑, 致使在具体的曲线细节上实测结果与计算仿真结果有较大的差距, 但是在曲线的整体轮廓和走势上与计算结果符合很好。另外, 在波长 4~5 μm 之间, 实测结果有一个较大的峰值和仿真计算结果有略微的错位, 这既可能是实际测量时的不确定性造成的, 也可能是由于探测器的漂移所产生的偏差, 还可能是由于该模型自身不足所引起。从两幅图的条件及结果可以看出, 当太阳天顶角固定时视场因子起着关键性的作用, 这与实际情况相吻合。视场因子较大时, 云在视场中所占比例较大, 对太阳光线的散射也较强, 因此探测器接收到的能量也较多, 表现观辐亮度也较大; 反之, 表现观辐亮度较小。

3 结束语

该模型的建立, 有效地提供了云背景在 1~5 μm 波段内表观光谱辐亮度数据源, 使得滤除云背景所引入的背景杂波成为可能, 有助于提高红外探测器的探测精度、红外制导武器的抗干扰能力。但本文中使用的视场因子是根据实测云图估计的, 不够准确, 如何准确计算视场因子还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Alexander Manolopoulos. Infrared Background and Target Measurement[R]. ADA163567. Naval Postgraduate School, 1985.
- [2] Thornburg R J, Devore J G, Thompson J. Review of The CLDSIM Cloud Radiation Simulation[R]. ADA306518. 1993.
- [3] GUO Xin-jun, JIN Wei-qi, WANG Zhi-yun, et al. An infrared apparent radiation model for clouds[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology (郭新军, 金伟其, 王志云, 等. 云层红外表现辐射模型的研究. 北京理工大学学报), 2003, 23(4): 414-418.
- [4] Coakley J, Chylek P. The two stream approximation in radiative transfer: including the angle of the incident radiation[J]. J Atmos Sci, 1975, 32: 409-418.
- [5] Liou K M, Wittman G D. Parameterization of radiative properties of Cloud[J]. J Atmos Sci, 1979, 36: 1261-1273.
- [6] Stephen G L, Ackerman S, Smith E A. A shortwave parameterization revise to improve cloud absorption[J]. J Atmos Sci, 1984, 41: 687-690.
- [7] LIU Jing-sheng. Infrared Physics[M]. Beijing: Weapon Industry Publishing Company (刘景生. 红外物理. 北京: 兵器工业出版社), 1992.
- [8] LIU Chang-sheng, YE Bo-ming. The effect of cloud distribution on the radiative heating and cooling rates[J]. ACTA Meteorologica Sinica (刘常盛, 叶伯明. 云层分布对辐射增热的和冷却的影响. 气象学报), 1991, 49(4): 483-493.
- [9] ZHANG Jing-xian, LI Yu-dan, JIN Wei-qi. Low light and infrared imaging technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术. 北京: 北京理工大学出版社), 1995.
- [10] ZHANG Jun, JIANG Fei-hong, GONG Yan-jun, et al. Computer simulation for infrared spectra of pollution clouds with FTIS detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis (张骏, 江飞虹, 宫颜军, 等. 傅里叶变换红外光谱仪遥感污染云层红外光谱的计算仿真. 光谱学与光谱分析), 2001, 21(5): 617-619.
- [1] Alexander Manolopoulos. Infrared Background and Target Measurement[R]. ADA163567. Naval Postgraduate School, 1985.
- [5] Figueiredo J M L, Stanley C R, Boyd A R. Optical modulation in a resonant tunneling relaxation oscillator[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(9): 1197-1199.
- [6] JIANG Yao-ting, YANG Jie, ZHOU Xiao-song. Developing status quo of laser interference technique[J]. Infrared and Laser Engineering (蒋耀庭, 杨杰, 周晓松. 激光干扰技术及发展状况. 红外与激光工程), 2001, 30(5): 387-390.
- [7] YANG Guo-guang. Measurement Technology for Modern Optics[M]. Zhejiang: Publication of Zhejiang University (杨国光. 近代光学测试技术. 浙江: 浙江大学出版社), 1997.
- [8] QI Hong-xing, LIU Zeng-dong, JIANG Rong-xi. A Doppler modulation for conquer optical "submerge" noise[J]. Study on Properties of Target and Environment (齐洪兴, 刘增东, 江荣熙. 一种克服光学“淹没”噪声的多普勒调制法. 目标与环境特性研究), 2003, 4: 45-49.

(上接第 559 页)

and Laser Engineering (朱大勇. 远程多普勒激光雷达. 红外与激光工程), 1996, 25(1): 8-15.