

Doppler 振镜正弦调制多光束激光外差二次谐波测量角度的方法*

李彦超[†] 王春晖 高龙 丛海芳 曲杨

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2011 年 3 月 18 日收到; 2011 年 3 月 24 日收到修改稿)

提出了一种多光束激光外差测微小角度的新方法. 基于激光外差技术和 Doppler 效应, 通过做简谐振动的 Doppler 振镜对同时刻入射光的正弦调制, 把待测角度信息加载到外差信号的频率差中, 经信号解调后可以得到待测角度参数值, 经加权平均处理可以提高待测角度的测量精度. 利用这种新方法, 通过 Matlab 仿真了平面标准镜不同入射角的模拟结果, 表明该仿真结果的最大相对误差小于 0.789677%.

关键词: 角度测量, 多光束激光外差, 激光 Doppler 技术, Fourier 分析

PACS: 06.30.Bp, 07.60.Ly, 42.25.Hz, 02.30.Nw

1 引言

精密角度测量是工程领域一直需要面对和解决的问题. 随着科学技术的发展, 角度测量设备和测量方法不断推陈出新, 如码盘、永磁同步电机、激光扫描仪、感应同步器、空间 Fourier 光谱仪和四象限探测器测角等高准确度测角器件及利用这些器件开发的测角设备的大量应用, 为工程设计和检测人员提供了大量角度测量问题的解决办法. 测角方法包括电荷耦合器件 (CCD) 光学测角法^[1,2]、激光干涉测量法^[3]、成像式光栅自准直测角法^[4]、基于 Moire 条纹的自准直测角法^[5]等. 利用这些方法一般都不能达到高准确度角度测量的要求.

由于光学测角具有非接触性、精度高和结构简单等特点而备受人们的重视, 因此使用光学测角的方法得到了越来越广泛的应用^[6-8]. 基于此, 提出了一种基于多光束激光外差检测的动态测角算法, 其特点是不需要动镜的方向信息, 可以在满足精度的同时实现大范围倾角检测. 本文介绍这种测角算法的原理和仿真实验结果.

为了能够采集到较好的激光差频信号和提高信号处理的运算速度, 本文基于激光外差技术, 提出了一种高精度多光束激光外差二次谐波测量微冲量的方法, 即通过 Doppler 振镜正弦调制将待测参数信息调制到激光外差信号的二次谐波中, 通过对激光外差信号二次谐波的解调可以精确获得待测参数信息.

2 测量角度的原理及实验方案

2.1 实验方案

正弦调制多光束激光外差测量二次谐波测量角度的实验方案如图 1 所示. 该装置由 H_0 固体激光器、平面反射镜、1/4 波片、振镜、偏振分束镜 (PBS)、会聚透镜、平面标准镜、光电探测器和信号处理系统 (该装置由滤波器、前置放大器、A/D 和数字信号处理器 (DSP)) 组成. 振镜在正弦驱动信号作用下做简谐振动, 加入振镜的好处是可以对同时刻入射到振镜表面的激光进行频率调制.

首先, 打开激光器, 使线偏振光依次经过 PBS

* 国家自然科学基金 (批准号: 61078063) 和哈尔滨工业大学重大国际科技合作培育计划 (批准号: HIT.ICRST.2010024) 资助的课题.

[†] E-mail: ycl.hit1982@yahoo.com.cn

和 $1/4$ 波片后照射到振镜前表面上, 而不同时刻被振镜调制的反射光又经过 $1/4$ 波片后透过 PBS 斜入射到反射镜表面上, 反射光经平面标准镜前表面透射的光被平面标准镜的后表面反射后, 与经过平面标准镜前表面反射的光一起被凸透镜会聚到探

测器光敏面上, 最后经探测器光电转换后的电信号经过滤波器、放大器、模/数 (A/D) 转换器和 (DSP) 后得到不同时刻待测的参数信息. 这样, 就可以通过正弦调制多光束激光外差二次谐波法测得激光入射角度.

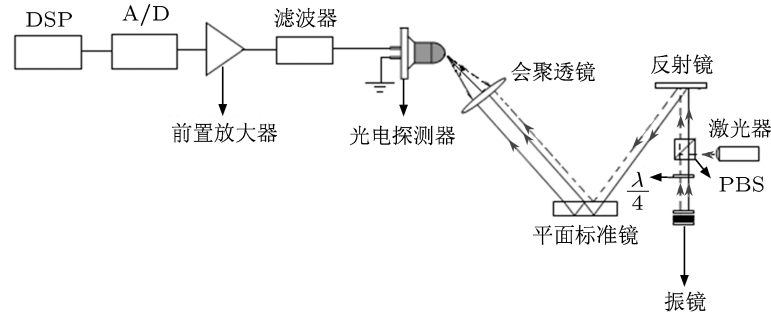


图1 实验方案设计

2.2 多光束激光外差二次谐波测量角度的原理

如图2所示, 由于光束在平面标准镜的前后表面之间会不断地反射和折射, 而这种反射和折射对于反射光和透射光在无穷远处或透镜焦平面上的干涉都有贡献, 所以在讨论干涉现象时, 必须考虑多次反射和折射效应, 即应讨论多光束激光干涉.

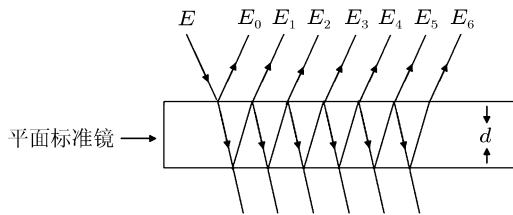


图2 多光束激光干涉原理

但是, 由于激光在玻璃前表面的反射光与玻璃后表面反射 k 次和 $k+1$ 次后的透射出玻璃前表面的光混频, 产生的两个差频信号的幅度相差 2—3 个数量级. 经过 Fourier 变换后, 为了能够采集到较好的激光差频信号和提高信号处理的运算速度, 所以在这里我们仅考虑所检测的后表面第 k 次反射的 E_k 与后表面 $k+2$ 次反射后的 E_{k+2} 光混频所

产生的二次谐波差.

当激光以入射角 θ_0 斜入射玻璃板前表面时, 设入射光场为

$$E(t) = E_l \exp(i\omega_0 t), \quad (1)$$

Doppler 振镜的振动方程

$$x(t) = x_0 \cos(\omega_c t), \quad (2)$$

速度方程为

$$v(t) = -\omega_c x_0 \sin(\omega_c t), \quad (3)$$

由于振镜的运动, 反射光的频率变为

$$\omega = \omega_0(1 - 2\omega_c x_0 \sin(\omega_c t)/c), \quad (4)$$

其中 ω_0 为激光角频率, x_0 为振镜振动的振幅, ω_c 为 Doppler 振镜的角频率, c 为光速.

则 $t - l/c$ 时刻到达平面标准镜前表面的反射光场为

$$E_0(t) = \alpha E_l \exp \{ i[\omega_0(1 - 2\omega_c x_0 \sin(\omega_c(t - l/c))/c) \times (t - l/c) + \omega_0 x_0 \cos(\omega_c(t - l/c))/c] \}. \quad (5)$$

而经平面标准镜透射的光在不同时刻被平面标准镜后表面多次反射后分别透射出平面标准镜的前表面, 其透射的表达式可以分别写成

$$E_1(t) = \alpha \alpha_1^2 E_l \exp \{ i[\omega_0(1 - 2\omega_c x_0 \sin(\omega_c(t - (l + 2nd \cos \theta)/c))/c) \times (t - (l + 2nd \cos \theta)/c) + \omega_0 x_0 \cos(\omega_c(t - (l + 2nd \cos \theta)/c))/c] \},$$

$$\begin{aligned}
E_2(t) &= \alpha^3 \alpha_1^2 E_l \exp \{ i[\omega_0(1 - 2\omega_c x_0 \sin(\omega_c(t - (l + 4nd \cos \theta)/c))/c) \\
&\quad \times (t - (l + 4nd \cos \theta)/c) + \omega_0 x_0 \cos(\omega_c(t - (l + 4nd \cos \theta)/c))/c] \}, \\
E_3(t) &= \alpha^5 \alpha_1^2 E_l \exp \{ i[\omega_0(1 - 2\omega_c x_0 \sin(\omega_c(t - (l + 6nd \cos \theta)/c))/c) \\
&\quad \times (t - (l + 6nd \cos \theta)/c) + \omega_0 x_0 \cos(\omega_c(t - (l + 6nd \cos \theta)/c))/c] \}, \\
&\vdots \\
E_m(t) &= \alpha^{2m-1} \alpha_1^2 E_l \exp \{ i[\omega_0(1 - 2\omega_c x_0 \sin(\omega_c(t - (l + 2mnd \cos \theta)/c))/c) \\
&\quad \times (t - (l + 2mnd \cos \theta)/c) + \omega_0 x_0 \\
&\quad \times \cos(\omega_c(t - (l + 2mnd \cos \theta)/c))/c] \},
\end{aligned} \tag{6}$$

其中, m 为非负整数, α 和 α_1 分别为平面标准镜的反射系数和透射系数, d 为平面标准镜的厚度, θ 为折射角, l 为振镜到玻璃前表面的距离.

这样, 探测器接收到的总光场可以表示为

$$E(t) = E_0(t) + E_1(t) + \cdots + E_m(t) + \cdots, \tag{7}$$

则探测器输出的光电流可以表示为

$$\begin{aligned}
I &= \frac{\eta e}{h\nu} \frac{1}{Z} \iint_S \frac{1}{2} [E_0(t) + E_1(t) + \cdots + E_m(t) + \cdots] \\
&\quad \times [E_0(t) + E_1(t) + \cdots + E_m(t) + \cdots]^* ds. \tag{8}
\end{aligned}$$

其中, e 为电子电量, Z 为探测器表面介质的本征阻抗, η 为量子效率, S 为探测器光敏面的面积, h 为 Planck 常数, ν 为激光频率.

由于原理部分我们指出只考虑 E_k 和 E_{k+2} 光混频所产生的差频信号, 直流项经过低通滤波器后可以滤除, 因此, 这里只考虑交流项, 此交流项通常称为中频电流, 整理可得中频电流为

$$\begin{aligned}
I_{if} &= \frac{\eta e}{2h\nu} \frac{1}{Z} \iint_S \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{j=p+2}^{\infty} \\
&\quad (E_p(t)E_j^*(t) + E_p^*(t)E_j(t)) ds. \tag{9}
\end{aligned}$$

将 (5) 式和 (6) 式代入 (9) 式, 最终结果为

$$\begin{aligned}
I_{if} &= \frac{\eta e}{h\nu} \frac{\pi}{Z} E_0^2 \sum_{p=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-p} \alpha_{j+p} \alpha_j \\
&\quad \times \cos \left[\frac{8nd \cos \theta \omega_0 \omega_c^2 x_0}{c^2} t \right. \\
&\quad \left. + \frac{2\omega_0 x_0}{c} - \frac{4nd \omega_0 \cos \theta}{c} \right. \\
&\quad \left. - \frac{8nd \cos \theta \omega_0 \omega_c^2 x_0 (l + 2pnd \cos \theta)}{c^3} \right], \tag{10}
\end{aligned}$$

忽略 $1/c^3$ 的小项之后可以简化为

$$I_{if} = \frac{\eta e}{h\nu} \frac{\pi}{Z} E_0^2 \sum_{p=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-p} \alpha_{j+p} \alpha_j$$

$$\begin{aligned}
&\times \cos \left(\frac{8nd \cos \theta \omega_0 \omega_c^2 x_0}{c^2} t \right. \\
&\quad \left. + \frac{2\omega_0 x_0 - 4nd \omega_0 \cos \theta}{c} \right), \tag{11}
\end{aligned}$$

其中, p 为非负整数.

通过 (11) 式可以看到, 多光束外差测量法获得的中频项频率差以及相位差中都有平面标准镜的厚度 d 的信息. 主要针对中频项中的频率差进行分析, 因为采用 Fourier 变换很容易实现频率测量. 此时, 根据 (9) 式, 可以把干涉信号的频率记为

$$\begin{aligned}
f &= 8nd \cos(\theta) \omega_0 \omega_c^2 x_0 / (2\pi c^2) \\
&= 4nd \cos(\theta) \omega_0 \omega_c^2 x_0 / (\pi c^2) = K \cos \theta. \tag{12}
\end{aligned}$$

由折射定律可知

$$\cos \theta = \cos \left[\arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{n} \right) \right]. \tag{13}$$

根据 (11) 和 (12) 式可知, 干涉信号的频率与平面标准镜入射角成反比, 比例系数为

$$K = 4nd \omega_0 \omega_c^2 x_0 / (\pi c^2), \tag{14}$$

与光源角频率 ω_0 、标准平面镜的折射率 n 、平面标准镜厚度 d 、振镜振幅 x_0 以及振镜振动频率 ω_c 有关.

需要说明的是, 通过 (13) 式可以看出在推导过程中此方法对于角度的测量范围没有任何限制, 即此方法适合于 0° — 90° 之间任意入射角度的测量, 因此只要知道了外差信号二次谐波的频率值就可以得到激光的入射角.

3 数值模拟与结果分析

根据上面的理论分析, 激光器的选取以 H_0 固体激光器波长 $\lambda = 2050 \text{ nm}$ 为例, 好处是此

激光对人眼安全,也可以根据实际需要选用其他波段的激光器;通常情况下平面标准镜的折射率 $n = 1.493983$, 厚度 $d = 0.02$ m;探测器的光敏面孔径为 $R = 1$ mm;灵敏度 1 A/W;取 Doppler 振镜振幅 $x_0 = 0.001$ m. 利用 MATLAB 仿真得到了不同入射角 θ_0 情况下,多光束激光外差二次谐波测量微小角度对应的多光束激光外差二次谐波信号 Fourier 变换频谱如图 3 所示. 从图 3 中可以看出,随着入射角的增加,频谱的相对位置向低频方向移动,即随着角度的增加频率减小. 原因在于:在平面标准镜厚度不变的情况下,比例系数 K 和频率是成正比关系的,在小角度情况下,当入射角增加时比例系数 K 随之减小,由于频率 f 与比例系数 K 关系为 $f = K \cos \theta$, d 不变的情况下,频率 f 和 K 呈线性关系. 因此, K 减小时频率也随之减小,即随着入射角的增加,频谱的相对位置向低频方向移动. 图 3 很好地验证了前面理论分析的正确性.

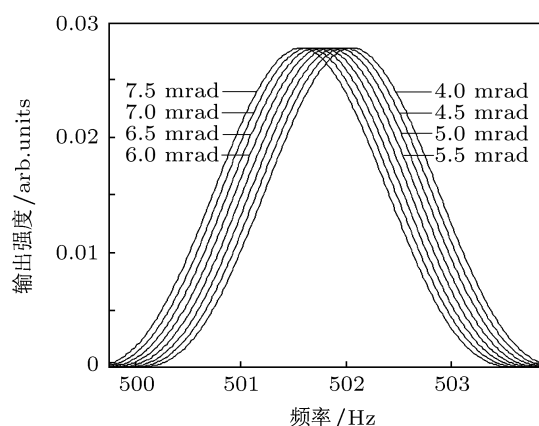


图 3 不同入射角测量对应的 Fourier 变换频谱

需要说明的是,由于外差探测是一种近衍射极限的探测方式,探测灵敏度极高,因此图 3 多光束激光外差二次谐波信号的信噪比非常高.

由于一般工程上多注重微小角度的测量,因此本文利用上述正弦调制多光束激光外差二次谐波测量法,以微小角度测量为例,连续仿真模拟了 8 组数据,得到了不同入射角的理论模拟结果,如表 1 所示.

需要说明的是:利用表 1 的仿真实验数据,最终可以得到模拟值的最大相对误差小

于 0.789677%. 可以看出该方法的测量精度是非常高的. 同时,分析数据还可以看出,环境带来的系统误差和读数误差在仿真中是可以忽略的,仿真实验中的误差主要来自于快速 Fourier 变换后的精度误差和计算过程中的舍入误差.

表 1 不同入射角的实际值和理论模拟值

次数	实际值 /mrad	理论模拟值 /mrad
1	4.0	4.020859
2	4.5	4.508149
3	5.0	4.994570
4	5.5	5.480128
5	6.0	5.964827
6	6.5	6.448671
7	7.0	7.052243
8	7.5	7.534182

4 结 论

针对传统的角度测量系统的特点和不足,提出了一种基于振镜正弦调制多光束激光外差二次谐波测量角度的方法. 通过在光路中加入振镜,振镜在正弦驱动信号作用下做简谐振动,可以对不同时刻入射到其前表面的光进行频率调制,把待测的角度信息加载到外差信号二次谐波的频率差中,通过 Fourier 变换很容易就可以解调出待测角度信息,且测量精度极高. 将激光外差技术和激光 Doppler 技术结合使用,将两种技术的优势很好地应用到了角度的检测上,使得调制、检测、处理简单易行.

仿真证明,该方法是一种良好的非接触测量角度的方法,可以应用在恶劣的测量环境上. 应用此方法测量角度具有精度高、线形度好、测量速度快等优势. 仿真结果表明,该方法模拟了不同角度的仿真结果,测量误差小于 0.789677%,说明该方法是可行、可靠的,能够满足微小角度测量的要求,为许多工程领域提供了很好的测量手段,可以广泛地应用于激光雷达、机械、仪器仪表和电子产品制造业中,具有很好的应用前景和价值.

- [1] Zhang B, Duan J, Jing W B 2010 *J. Changchun Univ. Sci. Technol.* **33** 55 (in Chinese) [张博, 段锦, 景文博 2010 长春理工大学学报 **33** 55]
- [2] Li J Y, Wu J T, Han H Q 2006 *Appl. Sci. Technol.* **33** 15 (in Chinese) [李金阳, 吴简彤, 韩慧群 2006 应用科技 **33** 15]
- [3] Liu C H, Jyw W Y, Tzeng S C 2004 *Appl. Opt.* **43** 2841
- [4] Zhang J Y, Fan T Q, Cao X D 2006 *Opto-electron. Engineer.* **33** 49 (in Chinese) [张继友, 范天泉, 曹学东 2006 光电工程 **33** 49]
- [5] Cai S, Liang S, Ding Z Y, Qiao Y F 2008 *J. Optoelectron. Laser* **9** 1375 (in Chinese) [蔡盛, 梁爽, 丁振勇, 乔彦峰 2008 光电子·激光 **9** 1375]
- [6] Hirai A, Matsumoto H, Lin D, Tagaki C 2003 *Opt. Express* **11** 1258
- [7] Bitou Y 2008 *Opt. Lett.* **33** 1777
- [8] Chen K H, Chang W Y, Chen J H 2009 *Opt. Express* **17** 14143

Second harmonic multi-beam laser heterodyne measurement for small angle based on oscillating mirror sinusoidal modulation*

Li Yan-Chao[†] Wang Chun-Hui Gao Long Cong Hai-Fang Qu Yang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 18 March 2011; revised manuscript received 24 March 2011)

Abstract

In this paper, we propose a novel method of multi-beam laser heterodyne measurement for small angle based on sinusoidal modulation of simple harmonic motion oscillating mirror. By using the Doppler effect and heterodyne technology, by loading the information about small angle into the frequency difference of the multi-beam laser heterodyne signal, by using the frequency modulation of the oscillating mirror, this method can give many values of small angle after the multi-beam laser heterodyne signal demodulation simultaneously. Processing these values by weighted-average, small angle can be obtained accurately. This novel method is used to simulate measurement for small angle by MATLAB, the obtained result shows that the relative measurement error of this method is just 0.789677%.

Keywords: angle measurement, multi-beam laser heterodyne, laser Doppler technology, Fourier analysis

PACS: 06.30.Bp, 07.60.Ly, 42.25.Hz, 02.30.Nw

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61068063), and Harbin Institute of Technology Incubation Program of Major International Science and Technology Cooperation, China (Grant No. HIT.ICRST2010014).

[†] E-mail: ycl.hit1982@yahoo.com.cn