

# 激光波长实时测量中的能量分析

陆 宏 姜铃珍 耿完桢 洪 晶

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨, 150001)

摘要: 本文从理论上分析了利用光栅实时测量激光波长中的能量及信噪比, 提供了实验的图象处理阶段照片及数据处理结果, 并从能量角度对实验结果进行了讨论。

关键词: 激光波长 光栅 实时测量 能量 信噪比

## Energy analysis about laser wavelength measurement in real-time

Lu Hong, Jiang Lingzhen, Geng Wanzhen, Hong Jing

(Dept. of Applied Physics, HIT, Harbin, 150001)

**Abstract:** The paper analyzed the energy and signal noise ratio (SNR) resulted from the measuring of laser wavelength with a grating. For the measurement of laser wavelength, it is needed to have proper laser energy and SNR. This paper presented the experimental data and taken photographs, and discussed the experimental results from the view point of the energy measurement.

**Key words:** laser wavelength grating measure in real-time energy signal noise ratio

### 一、引 言

激光波长的实时测量是激光信号探测中的一个热点问题, 它的最终目的是要实现在室外实时测量被动入射激光波长。以往的激光波长计一般都是在实验室中测量主动入射激光的波长, 由于是主动入射激光, 我们可以调节入射激光波长计的方向, 使之达到正入射, 并可粗略测知入射激光的波长范围, 从而简化了激光波长的测量难度; 由于这些激光波长计是用于实验室中, 我们可以使噪声基本消除, 并可适当调节入射激光强度, 使得测量效果良好。但实时测量被动入射激光波长则大不相同, 由于是被动入射, 我们无法预知待测激光的入射方向, 也无法获知其波长的粗略范围, 这就要求测量系统能够测量较大视角、较宽频带范围内的入射激光波长。为此, J. J. Snyder 提出用 F-P 标准具组来测量被动入射激光波长<sup>[1]</sup>, 此法虽然是一种有益的尝试, 但我们在实验中发现其自动处理时间较长, 虽经我们改进, 仍然一次测量需要 1s 量级。为实现在实时测量被动入射激光波长, 我们提出光栅法<sup>[2,3]</sup>, 此法可使激光波长的一次测量时间减少为 50ms。本文主要讨论我们提出的利用光栅实时测量激光波长中的能量和信噪比, 并提出了此法可探测激光波长所必须的入射激光能量范围。

### 二、激光波长实时测量中有关能量的理论分析

我们不难推出光栅衍射的能量分布公式是:

$$I = A_0^2 \sin^2 c^2 (\pi b \sin \theta / \lambda) \{ [\sin(N \pi d \sin \theta / \lambda)] / [\sin(\pi d \sin \theta / \lambda)] \}^2 \quad (1)$$

式中,  $A_0$  为入射激光的振幅,  $b$  为光栅每个狭缝的缝宽,  $d$  为光栅周期,  $\theta$  为激光经光栅的衍射角,  $\lambda$  为入射激光波长,  $N$  为光栅缝数。

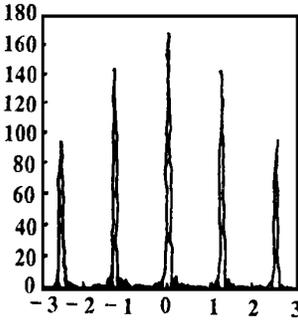


Fig.1 The grating diffraction pattern

令  $A_0 = 1$  (单位), 则由(1)式可得  $\theta/I$  关系曲线, 如图1。由图1可看出: (1) 光栅衍射的各峰值能量相差不多, 这有利于图象处理中的消噪声; (2) 光栅衍射的各峰值位置间距相等, 便于进行数据采集和自动计算。利用光栅实时测量激光波长的计算公式为:  $\lambda = \lambda_0 \Delta x / \Delta x_0$  (2) 式中,  $\lambda$  为待测激光波长,  $\lambda_0$  为基准激光波长,  $\Delta x$  为待测激光光栅衍射的相邻能量峰值间距,  $\Delta x_0$  为基准激光光栅衍射的相邻能量峰值间距。

由于通常在日光和灯光照射下的实验噪声主要是高斯白噪声, 我们可以把高斯白噪声的光强设为  $N_0$ , 则由

(1)式可以得到光栅法测量激光波长过程中的信噪比:

$$SNR = (A_0^2 / N_0) \text{sinc}^2(\pi b \sin \theta / \lambda) \{ [\sin(N \pi d \sin \theta / \lambda)] / [\sin(\pi d \sin \theta / \lambda)] \}^2 \quad (3)$$

实验中, 采用面阵 CCD 探测元件, 那么, CCD 探测到的光强应为信号光强和噪声光强之和:  $I_{\text{总}} = N_0 + I = N_0 + A_0^2 \text{sinc}^2(\pi b \sin \theta / \lambda) \{ [\sin(N \pi d \sin \theta / \lambda)] / [\sin(\pi d \sin \theta / \lambda)] \}^2$  (4)



Fig. 2 The measured grating diffraction pattern when  $N_0$  (light intensity of Gaussian white noise) =  $A_0^2$  (power of inside laser intensity)



Fig. 3 The measured grating diffraction pattern when  $N_0$  (light intensity of Gaussian white noise) =  $3A_0^2$  (power of inside laser intensity)



Fig. 4 The measured grating diffraction pattern when  $N_0$  (light intensity of Gaussian white noise) =  $7A_0^2$  (power of inside laser intensity)

由于 CCD 探测元件存在饱和光强, 因此可以设最大的可探测光强  $I_{\text{总}} = 1$  (单位)。令  $N_0 = A_0^2$ , 则可以得出  $\theta/I_{\text{总}}$  的关系曲线, 见图2。令  $N_0 = 3A_0^2$ , 则可以得出  $\theta/I_{\text{总}}$  的关系曲线, 见图3。令  $N_0 = 7A_0^2$ , 则可以得出  $\theta/I_{\text{总}}$  的关系曲线, 见图4。

由图2~4, 我们可以清楚地看到, 随着信噪比 SNR 的减小, 可探测激光信号逐渐减小, 直至探测不到。

### 三、利用光栅实时测量激光波长的实验照片及数据处理结果

为了保证我们的研究成果有可能推广到室外, 实验安排在点亮6支日光灯的房间内进行, 也就是说我们的实验是在很强的高斯白噪声的背景下进行的。图5是我们利用光栅实时测量激光波长过程中采下的原始实验照片, 由于信噪比 SNR 较小, 从原始照片用肉眼已看不出信号激光的光栅衍射; 图6是对图5进行消噪声处理后的照片, 先把图5和不含信号激光和背景光图象对应点灰度值相减, 得到信号激光的光栅衍射图象, 由于此时信号很弱, 人眼无法分辨, 不利于监测, 故把信号中最强的点的灰度值放大到255, 这样就得到了图6的清晰照片; 图7是图6照片中的能量分布, 这与图1中的  $\theta/I$  曲线是一致的; 图8是图7照片中的峰值位置照片, 这就把信

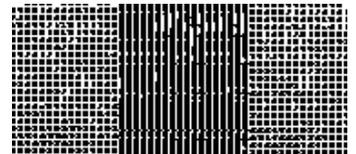


Fig. 5 The original grating diffraction photograph with white noise

号激光的光栅衍射图象进行了一维细化,进而可以采集出光栅衍射各级条纹的位置坐标,并进一步计算出入射激光波长。表 1 和表 2 给出了两次实验的数据处理结果。

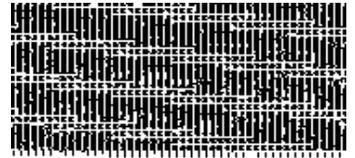
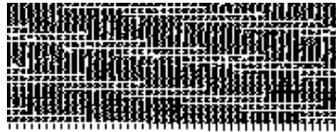
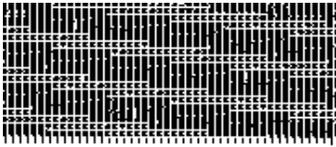


Fig. 6 The photograph removing white noise

Fig. 7 The energy distribution of grating diffraction

Fig. 8 One-dimension slendering of grating diffraction pattern

Table 1 The experimental data taken while the grating factor is 8/mm

the laser to be measured	$\overline{\Delta x}$	at $\overline{\Delta x_0} = 35.20$ $\lambda_1(\text{Å})$	at $\overline{\Delta x_0} = 35.00$ $\lambda_2(\text{Å})$	at $\overline{\Delta x_0} = 35.25$ $\lambda_3(\text{Å})$	$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3}(\text{Å})$
Ar <sup>+</sup> -1S, without noise	26.40	4746.0	4773.1	4739.3	4754.5
Ar <sup>+</sup> -1S-N <sub>1</sub> , with noise	26.38	4741.5	4768.6	4734.8	4748.3
Ar <sup>+</sup> -1S-N <sub>2</sub> , with noise	26.50	4764.0	4791.2	4757.2	4770.8
Ar <sup>+</sup> -1S-N <sub>3</sub> , with noise	26.38	4741.5	4768.6	4734.8	4748.3
mean	26.42	4748.2	4775.4	4741.5	4755.0
Ar <sup>+</sup> -2S, without noise	27.00	4853.9	4881.6	4847.0	4860.8
Ar <sup>+</sup> -2S-N <sub>1</sub> , with noise	27.00	4853.9	4881.6	4847.0	4860.8
Ar <sup>+</sup> -2S-N <sub>2</sub> , with noise	27.12	4876.3	4904.2	4869.4	4883.3
Ar <sup>+</sup> -2S-N <sub>3</sub> , with noise	27.00	4853.9	4881.6	4847.0	4860.8
mean	27.03	4859.5	4887.2	4852.6	4866.4
Ar <sup>+</sup> -3S, without noise	27.50	4943.7	4972.0	4936.7	4950.8
Ar <sup>+</sup> -3S-N <sub>1</sub> , with noise	27.60	4961.7	4990.1	4954.7	4968.8
Ar <sup>+</sup> -3S-N <sub>2</sub> , with noise	27.50	4943.7	4972.0	4936.7	4950.8
Ar <sup>+</sup> -3S-N <sub>3</sub> , with noise	27.50	4943.7	4972.0	4936.7	4950.8
mean	27.52	4970.7	4976.5	4941.2	4955.3
Ar <sup>+</sup> -4S, without noise	28.50	5123.5	5152.8	5116.2	5130.8
Ar <sup>+</sup> -4S-N <sub>1</sub> , with noise	28.50	5123.5	5152.8	5116.2	5130.8
Ar <sup>+</sup> -4S-N <sub>2</sub> , with noise	28.50	5123.5	5152.8	5116.2	5130.8
Ar <sup>+</sup> -4S-N <sub>3</sub> , with noise	28.38	5101.0	5062.4	5093.8	5115.9
mean	28.47	5117.9	5130.2	5110.6	5119.6

Footnote: The results are from the grating system of  $f = 8/\text{mm}$ .

#### 四、从能量角度对实验结果的讨论

我们实验中使用的 CCD 元件的光能分辨能力为 256,即可以探测出 0~ 255 灰度值的入射光,如果信号激光强度  $I < 1$  个灰度值,则系统不可探测,即待测激光信号经光栅衍射后的每一级光强可被探测的信噪比必须为:  $\text{SNR} \geq 1/254$

考虑到要想使用光栅实时测量激光光波长至少需要探测到三个光栅衍射级,故待测激光

信号入射光栅前的信噪比必须为:  $SNR \geq 3/254$

Table 2 The experimental data taken while the grating factor is 50/mm

the laser to be measured	$\Delta x$	at $\overline{\Delta x_0} = 68.3$ $\lambda_1 (\text{\AA})$	at $\overline{\Delta x_0} = 69.00$ $\lambda_2 (\text{\AA})$	at $\overline{\Delta x_0} = 68.6$ $\lambda_3 (\text{\AA})$	$\bar{\lambda} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)}{3}, (\text{\AA})$
Ar <sup>+</sup> -1C, without noise	51.20	4741.4	4695.6	4718.4	4718.5
Ar <sup>+</sup> -1G-N <sub>1</sub> , with noise	51.20	4741.4	4695.6	4718.4	4718.5
Ar <sup>+</sup> -1G-N <sub>2</sub> , with noise	51.20	4741.4	4695.6	4718.4	4718.5
Ar <sup>+</sup> -1G-N <sub>3</sub> , with noise	51.60	4778.4	4732.2	4755.2	4755.3
mean	51.30	4750.6	4704.4	4727.6	4727.5
Ar <sup>+</sup> -2C, without noise	52.60	4871.0	4824.0	4847.4	4847.5
Ar <sup>+</sup> -2G-N <sub>1</sub> , with noise	52.40	4852.5	4805.6	4828.9	4829.0
Ar <sup>+</sup> -2G-N <sub>2</sub> , with noise	52.40	4852.5	4805.6	4828.9	4829.0
Ar <sup>+</sup> -2G-N <sub>3</sub> , with noise	52.60	4871.0	4824.0	4847.4	4847.5
mean	52.50	4861.8	4814.8	4838.2	4838.3
Ar <sup>+</sup> -3C, without noise	53.40	4945.1	4897.3	4921.1	4921.2
Ar <sup>+</sup> -3G-N <sub>1</sub> , with noise	53.20	4926.6	4879.0	4902.7	4902.8
Ar <sup>+</sup> -3G-N <sub>2</sub> , with noise	53.20	4926.6	4879.0	4902.7	4902.8
Ar <sup>+</sup> -3G-N <sub>3</sub> , with noise	53.20	4926.6	4879.0	4902.7	4902.8
mean	53.25	4931.2	4879.0	4902.3	4904.2
Ar <sup>+</sup> -4C, without noise	55.50	5139.6	5089.9	5114.6	5114.7
Ar <sup>+</sup> -4G-N <sub>1</sub> , with noise	55.50	5139.6	5089.9	5114.6	5114.7
Ar <sup>+</sup> -4G-N <sub>2</sub> , with noise	55.50	5139.6	5089.9	5114.6	5114.7
Ar <sup>+</sup> -4G-N <sub>3</sub> , with noise	55.60	5155.0	5105.2	5130.0	5130.1
mean	55.54	5143.4	5093.7	5118.5	5118.5

Footnote: The results are from the grating system of  $f = 50/\text{mm}$ .

在我们实验室内点亮 6 支日光灯, 每支 40W, 即总噪声  $N = 40W \times 6 = 240W$ ; 设 6 支日光灯到探测器的距离近似相等, 距离  $R \approx 8\text{m}$ ; 而我们使用的探测系统的采光口径  $D = 2r = 0.2\text{m}$ 。由此可以计算出进入探测系统的高斯白噪声为:

$$N_0 = N \pi r^2 / (4\pi R^2) = N r^2 / (4R^2) = 0.0094W$$

则入射激光功率  $P = N_0 SNR \geq 0.0094W \times 3/254 \approx 1.1 \times 10^{-4}W = 110\mu W$

进一步考虑到系统元件的损耗, 我们认为在我们选用的实验环境中, 最小可探测  $200\mu W$  的入射激光的波长, 也就是说, 在 6 支日光灯的噪声中, 采用 256 级灰度分辨率的 CCD 元件利用光栅可以实时测量约  $200\mu W$  以上的激光波长。

## 五、结 论

利用光栅可以实时测量被动入射的激光波长, 但是当我们采用 256 级灰度分辨率的 CCD 作探测元件时, 被测激光的信噪比必须为:  $SNR > 3/254$

否则激光波长不可测量; 考虑到光学元器件的通光质量, 我们认为比较精确地实时测量被动入

## 轮圈端径跳动的激光动态检测

李承志 李岸然

(山东省科学院激光研究所, 济宁, 272117)

摘要: 本文给出汽车及摩托车轮圈端、径跳激光检测仪器的研制原理及研究途径, 并介绍其结构设计概况。

关键词: 轮圈 端面跳动 径向跳动 CCD 器件

## Dynamic measurement of axial and radial jitter of wheel rim by laser

Li Chengzhi, Li Anran

(Institute of Laser, Shandong Academy of Sciences, Jining, 272117)

**Abstract:** By means of optical and CCD image processing technique, a system for detection of the axial and radial jitter of wheel rim is introduced in this paper. With the system, the image of the wheel and the pattern shaded by the wheel are imaged on CCD sensor. According to the variations of the image and the shaded pattern, the axial and radial jitter can be calculated out. This paper gives out the main constructure of the detection system

**Key words:** wheel rim axial jitter radial jitter CCD sensor

### 一、引 言

汽车和摩托车轮圈之轮辋周缘装有轮胎, 通过轮辐的中心孔和螺栓孔与轮毂相联。易见轮圈的端面和径向跳动, 将在车辆行驶过程中产生附加的动载荷, 由此带来冲击和振动, 导致车辆功率消耗及机件寿命的降低。车轮轮圈的端径跳动量为车辆的一个主要性能指标。

车轮生产专业厂家, 极为重视轮圈端径跳的检测, 因为它是提高产品档次、促进规模和效益的重要手段。目前国内尚未有研制成功的仪器可供使用, 只有个别骨干企业引进的昂贵国外设备。中小工厂多采用样板手工靠逼检测部位、肉眼观测缝隙的方法实施检查, 极难控制质量。我们通过自己的科研实践, 已经探索出一条切实可行的研究途径, 并已完成整体方案的结构设计。

射激光波长的条件为:  $SNR > 10/254$

### 参 考 文 献

- 1 Snyder J J. Appl Opt, 1980; 19(8): 1223
- 2 陆 宏, 姜铃珍, 耿完桢 *et al.* 激光技术, 1994; 18(4): 249
- 3 陆 宏, 姜铃珍, 耿完桢 *et al.* 哈尔滨工业大学学报, 1994; 26(5): 16

作者简介: 陆 宏, 男, 1967 年出生。讲师。主要从事非线性光学、激光技术研究。