

文章编号:1002-2082(2007)05-0667-04

光束漂移的莫尔条纹检测原理

白宏^{1,2}, 荣健¹, 王秀¹

(1. 电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054; 2. 桂林空军学院, 广西 桂林 541003)

摘要: 针对大气湍流光束漂移,设计了一套使用莫尔条纹进行检测的系统,该系统具有检测微小长度和角度的特点,它是将光束漂移的微小角度借助条纹的方式进行放大。分析大气湍流条件下可能获得的最大条纹宽度,然后将条纹宽度和现有较好的CCD分辨率作比较。在CCD分辨率不足的情况下,采用莫尔条纹细分技术,通过适当的电路,将条纹的光信号转换成电信号,使相位变化转换为脉宽的变化,并在形成的方波中内插高频脉冲,通过测量脉冲数目可进一步实现高倍率细分,从而达到较高的分辨率,理论上系统的检测精度可达到 $0.025 \mu\text{rad}$ 。

关键词: 莫尔条纹; 光束漂移; 细分技术

中图分类号: TN247

文献标志码: A

Beam wander detected by Moiré fringe

BAI Hong^{1,2}, RONG Jian¹, WANG Xiu¹

(1. School of Physical Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Guilin Academy of Air Force, Guilin 541003, China)

Abstract: A system that uses Moiré fringe to detect the beam wander caused by atmospheric turbulence is presented. This system features tiny length and angle detection. The tiny angle of the beam wander was detected by using the Moiré fringe and amplified in the mode of fringe. The widest fringe obtained in the atmospheric turbulence was analyzed, and the width of the fringe was compared with the resolution of sophisticated CCD. Moiré fringe subdividing technique was used when the resolution of the CCD was not sufficient. The optical signal of the fringe was converted to the electric signal by a proper circuit, and the phase variation was converted to the pulse-width variation. The high frequency pulse was inserted into the formed square wave and the high-multiplying-power subdivision was attained by measuring the numbers of the pulse. The high resolution can be achieved by this method which can make detection precision of the system reach $0.025 \mu\text{rad}$.

Key words: Moiré fringe; beam wander; subdividing technique

引言

由于激光光束在大气中传输时受到大气湍流的影响,光斑呈现出明显的漂移效应,这对激光在大气中的工程应用,如光学跟踪系统和自由空间激光通信,具有重要的影响。实验中常利用CCD成像

器件^[1]、四象限探测器^[2]和光电倍增管^[3]等设备来研究光斑的位置变化,但这些器件在分辨率上有一定的局限性。本文利用莫尔条纹具有检测微小长度和角度的特点^[4]对大气湍流光束漂移进行检测,精度较高。

收稿日期:2007-03-08; 修回日期:2007-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60572079)

作者简介:白宏(1977—),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail:guilinbhong@163.com

1 莫尔条纹检测原理

莫尔条纹最早是由法国人发现的一种物理现象。如图1所示,2块栅距相等的黑白型长光栅刻线面对面相叠合,并使2块光栅的栅线形成微小夹角 θ ,这时,在近于与栅线垂直的方向上就会出现明暗相间的条纹,这就是莫尔条纹。

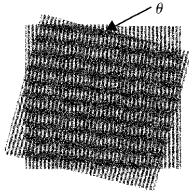


图1 莫尔条纹的形成

Fig. 1 The formation of Moiré fringe

用单色点光源或平面光波照射一个具有周期性透过率函数的物体时,会在该物体后的某些特定距离上出现该物体的清晰像,这种不用任何透镜就可以对周期物体成像的光学现象,叫做泰伯效应^[5]。这些特定的距离称为泰伯距离,如图所2(a)所示。当用平行光照射时,对空间周期为 d 的线光栅,泰伯距离 q 为

$$q = \frac{nd^2}{\lambda} \quad (n=1,2,3,\dots,L) \quad (1)$$

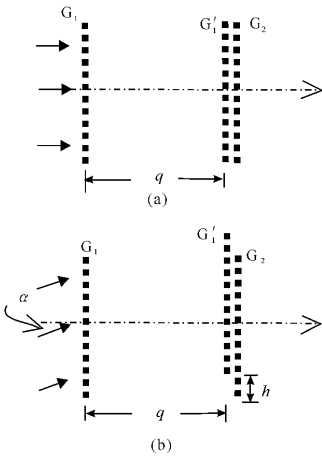


图2 入射光对泰伯像的影响

Fig. 2 The effect of incident light on Talbot image

光栅 G_1 在距离 q 处的自成像为 G'_1 ,在 q 处放上另一块光栅 G_2 ,两者组成一个虚拟的光栅副。设2光栅的空间周期均为 d ,则条纹间距和夹角的关系式为 $W \approx d/\theta$ 。可见莫尔条纹的移动量和移动方向与光栅的移动量和移动方向之间具有一一对应

的关系,即2块光栅相对移动1个栅距,莫尔条纹移动1个间距。当光栅的移动量为 x 时,条纹移动的距离 $X = h/\theta$ 。

当平行光以角度 α 入射时,光栅 G_1 在 q 处的自成像 G'_1 将平移一定的距离 h ,如图2(b)所示,光栅 G'_1 和 G_2 的相对位移 $h = q\alpha$ 。所以条纹移动的距离 $X = q\alpha/\theta$,即 $\alpha = X\theta/q$,代入 q 的表达式,得:

$$\alpha = \frac{X\theta\lambda}{nd^2} \quad (n=1,2,3,\dots,L) \quad (2)$$

由(2)式可知,光束漂移的入射角 α 和条纹移动的距离 X 有一一对应的关系,因此可以通过测量莫尔条纹的移动量来计算漂移角 α 。

2 莫尔条纹与 CCD 分辨率的比较

首先对(2)式进行分析,以此估算大气湍流情况下产生莫尔条纹的宽度。选用50线/mm的线光栅(即 $d = 0.02 \text{ mm}$)和 $\lambda = 600 \text{ nm}$ 的单色可见光,2光栅的夹角取 $\theta = 0.00174532 \text{ rad}$ (约 0.1°)。发现,夹角越小,条纹的间距越大,越容易测定,但受调节的限制,夹角不可能取得太小,而且角度越小,产生的误差越大。因为通过大气湍流光束漂移的角度一般都很小(在 $10 \mu\text{rad} \sim 100 \mu\text{rad}$ 范围内^[6]),取 $\alpha = 100 \mu\text{rad}$, n 取1。将上述数值代入(2)式中,得 $X = ad^2/\theta\lambda = 38.2 \mu\text{m}$ 。如果取 $\alpha = 10 \mu\text{rad}$,得 $X \approx 3.82 \mu\text{m}$ 。现在较好的CCD的分辨率可达到 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$ 。可见在这个分辨率下,对条纹并不能进行很好地分辨。为了解决这个问题,采用莫尔条纹细分技术对条纹进一步细分,可以达到所需的精度。

图3是整个系统的结构图,经过大气湍流后的光束被卡塞格伦天线接收后到达光栅系统,形成莫尔条纹。CCD接收后到莫尔条纹,经过细分电路转换为动态光电信号,即随时间变化的正弦信号,再转换成方波信号。在方波中内插高频脉冲,通过测量各方波中的脉冲数可将莫尔条纹细分,通过计算机算出这一瞬间对应的光束漂移角之值。采样大量的数据可分析光束漂移的整体趋势,依次判断大

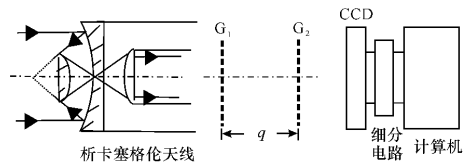


图3 系统结构图

Fig. 3 Structure of the system

气湍流光束漂移对系统造成的影响。

3 CCD 用于莫尔条纹细分技术

细分原理是利用 CCD 摄像器件将静态莫尔条纹转换为动态光电信号(即随时间变化的正弦信号),实现莫尔条纹高倍率电子细分^[7]。当运动光栅移动时,正弦信号的相位随位移而变,该信号经适当电路处理,将相位变化转换为脉宽的变化,通过测量脉宽来实现高倍率细分。

当用 CCD 接收莫尔条纹光信号时, CCD 输出的就是被莫尔条纹光强分布调制了的光电信号。莫尔条纹的光强分布可表示为^[8]

$$I(x-\xi) = I_0 + \sin(2\pi f_x x + 2\pi\xi/d) \quad (3)$$

式中: I_0 为光强的直流分量; f_x 为莫尔条纹在 x 方向的空间频率(y 方向为零); ξ 为运动光栅在 x 方向上的位置; d 是光栅常数。当用 CCD 接收该莫尔条纹信号时, CCD 输出的光电信号可写为

$$f(t) = kI(x-\xi) = U_0 + U_1 \sin(2\pi f_x l F t + 2\pi\xi/d) \quad (4)$$

式中: k 为 CCD 感光灵敏度系数; U_0 为电信号的

直流分量; l 为 CCD 有效光敏长度; F 为 CCD 帧转移频率。比较(3)和(4)2式可以看出, CCD 将光强随空间坐标 x 变化的莫尔条纹转换成电压(电流)随时间 t 变化的电信号。(3)式中的空间初位相转换成(4)式中的时间初位相。当 ξ 发生变化即运动光栅移动之后,莫尔条纹的空间初位相发生变化,光电信号的初位相同样发生变化。将随时间变化的光电信号作隔直处理,使之成为关于时间轴对称的正弦(余弦)信号,则(4)式可写为

$$f(t) = U_1 \sin(2\pi f_x l F t + 2\pi\xi/d) \quad (5)$$

通过适当的电路处理,找出光电信号对应的过零点,用适当逻辑电路产生从 CCD 的起始脉冲到莫尔条纹第一过零点的方波。该方波的宽度与莫尔条纹空间初位相的大小对应。

图 4(a)和(a')为莫尔条纹光强随空间坐标 x 的变化曲线;图 4(b)和(b')为经过隔直处理后的光电信号曲线;图 4(c)和(c')为起始脉冲和过零点信号脉冲;图 4(d)为起始点和第一过零点合成的方波,以及莫尔条纹一个整周期对应的方波;图 4(d')为移动后起始点和第一过零点合成的方波。

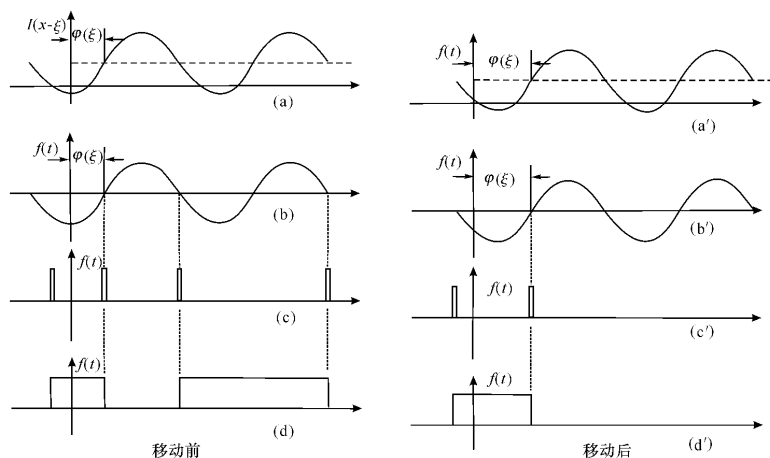


图 4 方波示意图

Fig. 4 Sketch of the square wave

为了克服光栅的起始位置与停止位置之间脉冲的位置误差,同时修正由莫尔条纹的非正弦性引起的误差,将合成方波的起始点选择在有效信号的前一段时间。

在方波内插高频脉冲,将高频脉冲数作为当时测量的细分度。设起始时第一方波内所含的高频脉

冲数为 n_0 ,对应的整周期方波内所含的高频脉冲数为 N 。经过一瞬时,光束发生漂移,从而使光栅发生相对移动,莫尔条纹发生移动,对应的光强波形发生移动,此时方波内所含的高频脉冲数为 n_1 。则移动前后高频脉冲数的变化为 $n_1 - n_0$ 。由于整周期方波对应莫尔条纹的一个整周期,即对应一个莫尔条

纹间距 W 。那么 $n_1 - n_0$ 个脉冲对应的条纹移动就应当为

$$X = \frac{W}{N}(n_1 - n_0) \quad (6)$$

将其代入(2)式,且 $W \approx \frac{d}{\theta}$,可得:

$$\alpha = \frac{\lambda}{Nd}(n_1 - n_0) \quad (7)$$

下面具体分析(7)式中整周期方波内所含的高频脉冲数 N 。设高频脉冲数的频率为 f , (5)式可以改写为

$$f(t) = U_1 \sin\left(\frac{2\pi}{f_x l F} t + 2\pi \xi / d\right) \quad (8)$$

即周期 $T = \frac{1}{f_x l F}$; f_x 为莫尔条纹在 x 方向的空间

频率(y 方向为零)。依据 $W = \frac{1}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}$ ^[9],得 $f_x =$

$\frac{1}{W}$,因此 $T = \frac{W}{lF} = \frac{d}{\theta l F}$ 。

在周期 T 内的高频脉冲数 $N = T \cdot f = \frac{df}{\theta l F}$,将其带入(7)式,可得:

$$\alpha = \frac{\lambda \theta l F}{d^2 f}(n_1 - n_0) \quad (9)$$

现讨论(9)式的检测精度。设理想情况下,系统的灵敏度能够检测出一个脉冲差,即 $n_1 - n_0 = 1$ 。同样选用 $\lambda = 600 \text{ nm}$ 的单体可见光, $d = 0.02 \text{ nm}$, $\theta = 0.00174532 \text{ rad}(0.1^\circ)$ 。内插高频脉冲的频率 $f = 160 \text{ MHz}$; 选用像素数为128, 像素尺寸为 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$, 帧频 $F = 736 \text{ 帧/s}$ 的线阵CCD。代入以上数据,可得到理想情况下 $0.025 \mu\text{rad}$ 的系统检测精度。

最后,通过计算机选取大量数值进行计算分析,可得到一定时间内光束漂移角的分布情况,进而可分析出大气湍流对光束漂移产生的影响大小。

由于CCD光敏元的面积很小,每个像元接收到的光能量只是莫尔条纹上的很少部分,为了弥补这方面的不足,提高光电信号质量,在CCD前面加上适当焦距的柱透镜,将莫尔条纹沿其自身方向压缩。通过将CCD的光敏元调节在柱透镜的焦线上,可获得良好的光电信号。

4 结束语

利用莫尔条纹能检测微小长度和角度的特点,设计合理的系统检测光束漂移的微小角度变化,并

通过设计细分技术,进一步提高了系统的精度。该结构具有测量直接、使用较方便、测量精度高等特点。因此,它用来检测光束方向微小漂移具有很大的优越性。但也存在系统调节过程和细分电路设计较复杂等问题,可望通过适当的设计优化来解决。

参考文献:

[1] 王春阳,李金石. 激光光斑漂移的检测[J]. 应用光学, 2007, 28(2): 205-208.
WANG Chun-yang, LI Jin-shi. Detection of laser spot drift [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28 (2): 205-208. (in Chinese)

[2] DUNPHY J R, KERR J R. Turbulence effects on target illumination by laser sources: phenomenological analysis and experimental results [J]. Appl. Opt., 1977, 16(5): 1345-1358.

[3] 饶瑞中,王世鹏,刘晓春,等. 湍流大气中激光束漂移的实验研究[J]. 中国激光, 2000, 27(11): 1011-1015.
RAO Rui-zhong, WANG Shi-peng, LIU Xiao-chun, et al. Experimental study of spot dancing of laser beam in a turbulent atmosphere [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(11): 1011-1015. (in Chinese)

[4] YANG Kun-tao, LIAO Zhao-shu, TAO Jing-guang, et al. New application of lateral Moiré fringe [J]. SPIE, 1993, 2101: 886-889.

[5] PATORSKI K, PARFJANOWICZ G. Self-imaging-phenomenon of a sinusoidal complex object [J]. Opt. Acta, 1981, 28(3): 357-367.

[6] PHILLIPS R L, ANDREWS L C, STRYJEWSKI J, et al. Beam wander experiments: terrestrial path [J]. SPIE, 2006, 6303: 61-69.

[7] LI Huai-qiong, CHEN Qian, ZHANG Can-li. New sense-finding and subdividing technique for high speed Moiré fringes [J]. SPIE, 2006, 6150: 251-255.

[8] 曹国荣,景芳盛,任莹. CCD用于莫尔条纹细分的技术[J]. 计量学报, 1995, 16(2): 116-120.
CAO Guo-rong, JING Fang-sheng, REN Ying. A technique for subdividing Moiré fringes by using CCD [J]. Acta Metrologica Sinica, 1995, 16(2): 116-120. (in Chinese)

[9] 王仕璠,朱自强. 现代光学原理[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1998: 64-65.
WANG Shi-fan, ZHU Zi-qiang. Modern optics theory [M]. Chengdu: University of Electronics Science and Technology of China Press, 1998: 64-65. (in Chinese)