

文章编号: 1001-3806(2005)02-0156-03

利用光栅测量远场入射激光波长的方法研究

王挺峰, 付有余, 郭 劲*, 米 阳

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 依据光栅衍射原理, 采用电荷耦合器件 CCD 作为探测器, 通过测量入射激光成像点在电视靶面坐标系中的脱靶量, 确定光栅的入射角和衍射角, 提出了一种利用固定式平面反射光栅测量远场未知方位入射激光波长的方法。介绍了该方法的原理及光学系统结构, 阐述了成像点脱靶量与光栅入射角和衍射角的关系, 推导了入射激光的波长计算公式, 结合光学系统的结构给出了计算波长测量误差的表达式。远场测量模拟实验验证了该方法的可行性。

关键词: 波长测量; 光栅; CCD; 远场; 激光

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

Measuring incident laser wavelength in far field with grating

WANG Ting-feng, FU You-yu, GUO Jin, MI Yang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Based on the principle of grating diffraction, by using television measuring system to measure the offset between the imaging of incident laser and the optical axis to confirm the angle of incidence and the angle of diffraction of the grating, a method of measuring incident laser wavelength in far field with grating is brought up. The measurement principle and the optical system of this method are introduced. The expressions of calculating laser wavelength are deduced in detail. The expressions of calculating the precision of wavelength measurement are presented, after analyzing the structure of measurement system. The feasibility of this method is testified by the simulation experiment of far field measurement.

Key words: wavelength measurement; grating; CCD; far field; laser

引 言

对远场未知方位的入射激光进行波长测量, 在军事上具有重大的应用价值。早期测量入射激光波长多采用干涉法^[1,2], 其中利用迈克尔逊干涉法和法布里-珀罗干涉法等研制的测量装置已经出现并在实际测量中得到了应用。但由于干涉法的远场测量设备结构过于复杂并且可靠性差, 因此, 近年来利用光栅进行激光波长测量的研究报道大量出现^[3~5], 但大多数测量方法仅限于理论探索, 用于远场测量的方法很少。下面将介绍一种利用固定式平面反射光栅对远场未知方位的入射激光进行波长测量的方法, 并通过远场测量模拟实验对该方法的可行性进行验证。

1 测量原理

根据光栅的衍射原理^[6], 一束单色光经过光栅,

当入射光束与衍射光束位于光栅法线异侧时, 衍射光束、波长及入射光束之间满足光栅衍射方程:

$$m\lambda = d(\sin i - \sin i') \quad (1)$$

式中, λ 表示波长, d 表示光栅常数, i 表示入射角, i' 表示衍射角, m 表示衍射光谱的级次, 且 $m = 0, \pm 1, \dots$ 。根据光栅衍射方程, 若光栅常数 d 和衍射光谱的级次 m 确定, 则只要知道了入射角和衍射角, 就能计算出波长。

利用固定式平面反射光栅测量入射激光波长的原理见图 1。图中, L_1, L_2, L_3 表示透镜, G 表示反射光

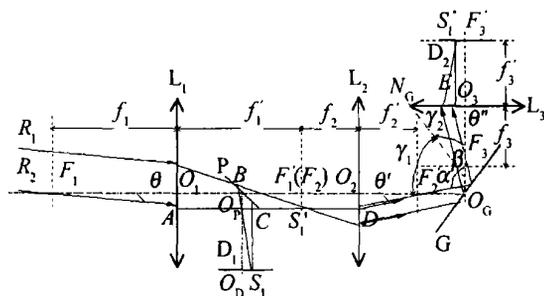


Fig 1 Sketch map of laser wavelength measurement system

栅, P 表示分光镜, $O_1, O_2, O_3, F_1, F_1', F_2, F_2', F_3, F_3'$ 分别为透镜及透镜焦平面 (图中虚线) 与光轴 (图中单点划线) 的交点, O_D 为探测器 D_1 的接收面与光轴的交

基金项目: “十五” 预研基金资助项目 (41101050203)

作者简介: 王挺峰 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事光电探测与信息处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: guociamp@sina.com

收稿日期: 2004-03-29; 收到修改稿日期: 2004-06-16

点, O_P 为分光镜 P 与光轴的交点, O_G 为光栅与光轴的交点, N_G 为光栅法线。光轴 $O_P O_D$ 与光轴 $O_1 O_G$ 垂直, 分光镜 P 的法线与光轴成 45° 角, 探测器 D_1 的接收面与光轴 $O_1 O_G$ 平行, 且探测器 D_1 的接收面到 O_P 点的距离与透镜 L_1 像方焦平面到 O_P 点的距离相等, 透镜 L_1 的像方焦平面与透镜 L_2 的物方焦平面位置重合, 探测器 D_2 的接收面与透镜 L_3 的像方焦平面位置重合。

激光的方向性好, 远场入射的光, 可近似地看成是一束平行光, 如图 1 所示, 假设所有的光线都处在过光轴的另一平面内, 用两条与光轴 $O_1 O_G$ 成 θ 角的平行光线 R_1 和 R_2 表示一束入射激光, 入射激光经透镜 L_1 聚焦、分光镜 P 分光后, 分别在探测器 D_1 上成像为点 S_1 , 在透镜 L_1 的焦平面上成像为点 S_1' , 经透镜 L_2 准直、光栅 G 衍射、透镜 L_3 聚焦后在探测器 D_2 上成像为点 S_1'' , 且与光栅法线所成的入射角为 α , 衍射角为 β , 这样, 根据图中的几何关系, 就能确定光栅的入射角 α 和衍射角 β 。

根据理想光学系统的成像性质, 进入上述光学系统中的一束平行光, 其中必有一条特殊光线, 它恰好经过透镜 L_1 的物方焦点 F_1 、透镜 L_2 的像方焦点 F_2' , 经光栅衍射后又经过透镜 L_3 的物方焦点 F_3 。在这里, 假设光线 R_2 就是这条特殊光线。追迹光线 R_2 , 它与透镜 L_1 交于 A 点, 与分光镜 P 交于 C 点, 与探测器 D_1 交于 S_1 点, 与透镜 L_2 交于 D 点, 与透镜 L_3 交于 E 点, 与探测器 D_2 交于 S_1'' 点。则 $\angle A O_1 F_1$ 就是入射激光与光轴 $O_1 O_G$ 所成的夹角 θ ; $\angle D F_2' O_2$ 就是入射激光经透镜 L_2 准直后与光轴 $O_1 O_G$ 所成的夹角, 用 θ 表示; $\angle E F_3 O_3$ 就是入射激光经光栅衍射后与光轴 $O_G O_3$ 所成的夹角, 用 θ 表示。

系统中各参量符号的规则如下。

(1)沿轴线段: 在水平方向规定光线的方向自左向右, 在垂直方向规定光线的方向自下向上, 以透镜与光轴的交点为原点, 与光线方向相同, 其值为正, 反之则为负。

(2)垂轴线段: 以光轴为基准, 在光轴 $O_1 O_G$ 以上、光轴 $O_P O_D$ 以右和光轴 $O_G O_3$ 以左为正; 在光轴 $O_1 O_G$ 以下、光轴 $O_P O_D$ 以左和光轴 $O_G O_3$ 以右为负。

(3)光线与光轴的夹角: 用由光轴转向光线所形成的锐角度量, 顺时针为正, 逆时针为负。

(4)光线与法线的夹角: 由光线以锐角方向转向法线, 顺时针为正, 逆时针为负。

(5)光轴与法线的夹角: 由光轴以锐角方向转向法线, 顺时针为正, 逆时针为负。

因此, f_1, f_2, f_3 为负值, f_1', f_2', f_3' 为正值, 线段 $O_1 A, F_1' S_1', O_2 D$ 为负值, $O_3 E, F_3' S_1'', O_D S_1$ 为正值, $\theta,$

α, γ_1 为正值, $\theta', \theta'', \gamma_2, \beta$ 为负值。

基于上述符号规则, 则光栅的衍射方程可表示为:

$$m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (2)$$

根据图中的几何关系, 有:

$$\alpha = \gamma_1 - \theta' \quad (3)$$

$$\beta = \gamma_2 - \theta'' \quad (4)$$

$$\tan\theta' = \frac{O_2 D}{O_2 F_2'} = \frac{O_2 D}{f_2'} = \frac{O_2 D}{-f_2} = \frac{O_D S_1}{f_2} \quad (5)$$

$$\tan\theta'' = \frac{-O_3 E}{O_3 F_3} = \frac{-O_3 E}{f_3} = \frac{-F_3' S_1''}{f_3} \quad (6)$$

其中, (3)式和(4)式中的 γ_1 和 γ_2 分别为光栅法线 N_G 与光轴 $O_1 O_G$ 和与光轴 $O_G O_3$ 的夹角, 其值恒定由光栅在光学系统中的位置决定; (5)式和(6)式中的线段 $O_D S_1$ 和线段 $F_3' S_1''$ 分别为入射激光成像点相对于系统光轴的偏移量。

则根据(3)式~(6)式, 入射角 α 和衍射角 β 可描述为:

$$\alpha = \gamma_1 - \arctan(O_D S_1 / f_2) \quad (7)$$

$$\beta = \gamma_2 + \arctan(F_3' S_1'' / f_3) \quad (8)$$

确定了光栅的入射角和衍射角, 入射激光的波长就能测量。为了记述方便, 用 d_1 表示线段 $O_D S_1$, 用 d_2 表示线段 $F_3' S_1''$, 则入射激光的波长计算公式可描述为:

$$\lambda = (d/m) \{ \sin[\gamma_1 - \arctan(d_1 / f_2)] + \sin[\gamma_2 + \arctan(d_2 / f_3)] \} \quad (9)$$

式中, 光栅常数 d 、衍射光谱级次 m 以及透镜的焦距 f_2, f_3 为已知量, 光栅法线与光轴的夹角 γ_1 和 γ_2 可通过系统标定得到, 偏移量 d_1 和 d_2 可通过 CCD 成像根据电视脱靶量测出。

2 成像点偏移量的确定^[7~9]

电视脱靶量是指目标成像点在靶面坐标系中相对于坐标原点的偏差量, 采用笛卡尔直角坐标系表示的靶面坐标, 如图 2 所示。在推导入射激光波长计算公式时, 曾假设所有的入射光线都处在过光轴的另一平

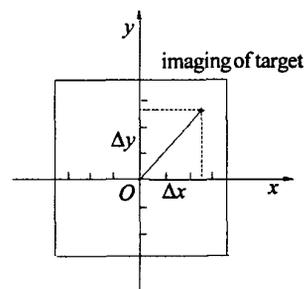


Fig 2 Sketch map of quantity of missing a target

面内, 如果光轴与探测器接收面的交点能够与靶面坐标系中的坐标原点重合, 并且上述平面和 CCD 接收面(即靶面)的交线与坐标系中的一条轴重合, 那么根据入射激光成像点的脱靶量就能确定偏移量 d_1 和 d_2 。在进行系统装调时, 只要保证光栅法线与光栅狭缝所

构成的平面与上述平面正交,上述两点要求就能实现。如图2所示,假设x轴为上述平面与靶面的交线,则脱靶量在x轴上的分量就是要求的偏移量。

3 测量误差分析

波长测量准确度和波长测量重复性是评价波长测量误差的主要依据,通过对激光波长计算公式中的相应项求变分可导出其定量表达式。依据(9)式,影响波长测量准确度的误差主要是光栅常数误差、透镜焦距误差、光栅法线方向误差和偏移量的测量误差,其中,光栅常数误差对波长测量准确度的影响最大;影响波长测量重复性的误差主要是偏移量的测量误差。

计算波长测量准确度的表达式如下:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda = & (\Delta d/m) (\sin\alpha + \sin\beta) + \\ & (d/m) [\Delta\gamma_1 \cos\alpha + \Delta\gamma_2 \cos\beta - \Delta d_1 \cos\alpha f_2 / (d_1^2 + f_2^2) + \\ & \Delta d_2 \cos\beta f_3 / (d_2^2 + f_3^2) + \Delta f_2 \cos\alpha d_1 / (d_1^2 + f_2^2) - \\ & \Delta f_3 \cos\beta d_2 / (d_2^2 + f_3^2)] \end{aligned} \quad (10)$$

计算波长测量重复性的表达式如下:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda = & (d/m) [\Delta d_2 \cos\beta f_3 / (d_2^2 + f_3^2) - \\ & \Delta d_1 \cos\alpha f_2 / (d_1^2 + f_2^2)] \end{aligned} \quad (11)$$

式中, Δd 为光栅常数误差; Δd_1 和 Δd_2 为偏移量测量误差; $\Delta\gamma_1$ 和 $\Delta\gamma_2$ 为光栅法线方向误差; Δf_2 和 Δf_3 为透镜焦距误差。光栅常数误差与所选光栅元件有关;光栅法线方向误差与系统标定时测得的夹角精度有关;透镜焦距误差与系统装调时的尺寸精度有关;偏移量测量误差与 CCD 的单元尺寸有关。

若光栅常数误差为 1/1000 光栅常数,光栅法线方向误差为 1',装调时尺寸精度为 1/100mm, CCD 的单元尺寸为 14 μ m,透镜 L₂ 的焦距为 120mm,透镜 L₃ 的焦距为 150mm,采用正一级衍射光谱,对于可见光及近红外波段的激光,当采用每毫米 1000 栅线的光栅测量其波长时,其波长测量准确度可达 ± 1 nm,波长重复性可达 ± 0.01 nm,测量方法的精度很高。

4 模拟实验

以闪耀波长为 600nm,每毫米 1000 栅线的平面反射光栅为色散元件,采用正一级衍射光谱,自制了一台探测视场为 1°、波长测量范围为 500nm~1000nm、波长测量准确度为 ± 1 nm、波长重复性为 ± 0.01 nm 的测量装置样机,在室内进行了远场测量模拟实验。实验

的系统组成如图3所示,对掺钛宝石可调谐激光器发出的波长为 749.97nm, 754.99nm, 775.28nm 以及 800.28nm 的激光,从不同方位进行了测量。测量结果见表1,测得的激光波长与实际值相符。

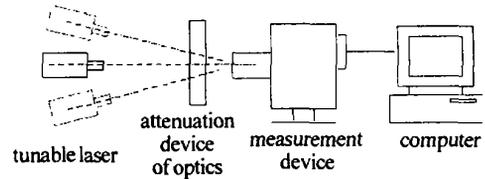


Fig 3 Sketch map of far field measurement simulation experiment

Table 1 Result of wavelength measurement

actual wavelength/nm	orientation 1/nm	orientation 2/nm	orientation 3/nm
749.97	748.71	750.29	749.97
754.99	754.99	754.68	754.37
775.28	774.03	774.58	775.59
800.28	799.35	800.58	799.66

5 结论

对一种利用光栅测量远场入射激光波长的方法进行了研究,推导出了利用该方法进行波长测量的计算公式,并给出了计算波长测量准确度和波长重复性的定量表达式。研究证明,利用固定式平面反射光栅对远场入射激光进行波长测量,其方法是可行的。

参考文献

- [1] MONCHAL N J P. Accurate laser wavelength measurement with a precision two-beam scanning Michelson interferometer [J]. Appl Opt, 1981, 20(5): 736~740.
- [2] FISCHER A. Computer controlled Fabry-Perot wavemeter [J]. Opt Commun, 1981, 38(5): 177~281.
- [3] 陆宏,姜铃珍,耿完桢 *et al* 利用光栅实时测量大视角入射激光波长的方法 [J]. 激光技术, 1994, 18(4): 249~252.
- [4] 陆宏,姜铃珍,耿完桢 *et al* 利用双光栅实时测量大视角入射激光波长的方法 [J]. 激光技术, 1995, 19(6): 341~343.
- [5] 赵霞. 利用线阵 CCD 实现宽波段、大视场短脉冲激光波长的远场测量 [J]. 光电工程, 1996, 23(5): 29~33.
- [6] 郁道银,谈恒英. 工程光学 [M]. 北京:机械工业出版社, 1999. 247~273.
- [7] 刘艳滢,王延杰. 电视脱靶量的实时输出 [J]. 光学精密工程, 1994, 2(5): 72~77.
- [8] 王庆有. CCD 应用技术 [M]. 天津:天津大学出版社, 2000. 120~171.
- [9] 曾延安,梁荫中. CCD 在光谱分析系统中的应用研究 [J]. 激光技术, 1998(4): 3~4.