

文章编号:1005-4642(2021)07-0046-05

学
生
园
地



利用动态散斑测量激光波长

闫崧明^a, 尹文含^a, 王 菁^b

(北京航空航天大学 a. 仪器科学与光电工程学院; b. 物理学院, 北京 100191)

摘 要: 设计了基于动态散斑测量激光波长的教学实验. 应用旋转毛玻璃产生动态散斑, 通过理论分析, 确定成像系统中散斑对比度的影响参量, 测得散斑对比度与毛玻璃转速的关系曲线, 由曲线可得散斑对比度与毛玻璃旋转线速度的平方根呈反比关系; 通过参量比对, 利用曲线斜率平方与入射光波长的正比关系可测得待测激光器的输出波长.

关键词: 激光波长; 动态散斑; 旋转毛玻璃; 成像系统

中图分类号: O436. 1; TN247

文献标识码: A

DOI: 10. 19655/j. cnki. 1005-4642. 2021. 07. 008

利用现代科学技术开发波长测量实验是教学实验设计者追求的目标^[1-6]. 现代光学成像检测技术的发展过程中, 研究人员采用多种方法抑制激光散斑, 提高成像质量^[7], 其中通过运动散射体产生动态散斑对成像结果进行叠加匀化的方法因其结构简单、可操作性强等优点被广泛应用^[8-15]. 设计基于动态散斑的激光波长测量教学实验, 不仅为传统波长测量提供了新思路, 也可丰富低年级本科生对于激光散斑现象的理解. 本文采用旋转毛玻璃产生动态散斑, 总结成像系统中包含激光波长的理论表达形式, 选取简单易测量的变量, 设计实验验证理论公式, 求解未知光源的波长.

1 实验原理

为了抑制散斑的相干噪声, 研究者大多在成

像系统中插入毛玻璃, 实验装置如图 1 所示. 经过空间滤波、扩束、准直后, 激光束聚焦到旋转的毛玻璃上, 后成像在 CCD 上. 由于 CCD 存在一定的曝光时间 T , 同时毛玻璃快速旋转, 故 CCD 接收到的图像为多次叠加匀化后形成的动态散斑^[7]. 图 2 为毛玻璃在不同转速下的散斑图样(从左到右转速逐渐增加), 随着转速的增加, 图像被匀化效果愈发明显.

根据 Goodman 的统计光学理论^[15], 应用散斑对比度来衡量散斑光强的起伏情况^[16], 一般表述为

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}}, \quad (1)$$

即对比度 C 是散斑图样中强度的涨落均方差 σ_I 相对于平均强度 \bar{I} 的度量. 由于光经过毛玻璃不

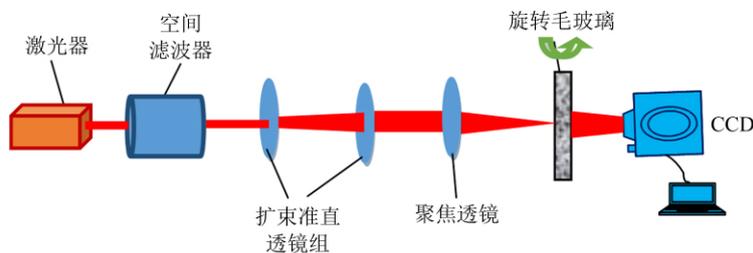


图 1 带旋转毛玻璃的成像系统光路示意图

收稿日期: 2020-11-17; 修改日期: 2021-01-03

作者简介: 闫崧明(1998—), 男, 天津人, 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 2016 级本科生. E-mail: 1041950386@qq.com

通讯作者: 王 菁(1984—), 女, 天津人, 北京航空航天大学物理学院实验师, 硕士, 主要从事光学实验教学与科研工作. E-mail: jingwang@buaa.edu.cn



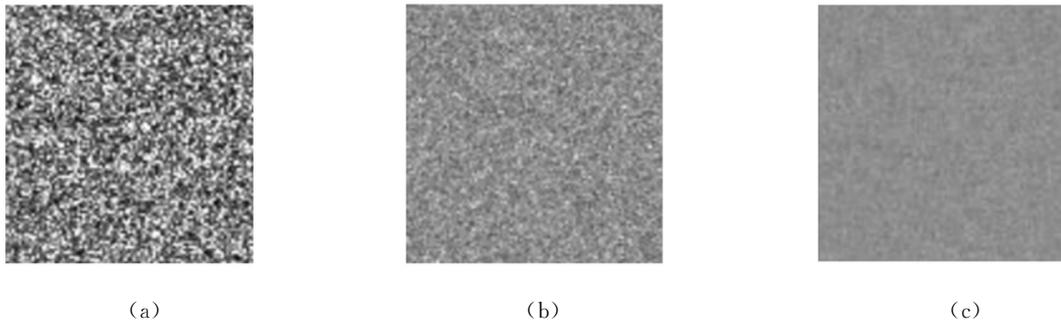


图 2 毛玻璃不同转速下的动态散斑图样

同位置的散斑图样是统计独立的,所以在曝光时间 T 内,CCD 所接收到的散斑图样实际为 N 幅独立散斑图样的叠加,使散斑对比度降低到毛玻璃为静态时的 $1/\sqrt{N}$ ^[17].

像场的归一化自协方差函数随时间 τ 的表达形式为^[15]

$$\mu_A(\tau) \approx \frac{2J_1\left(\frac{\pi D v \tau}{\lambda z}\right)}{\frac{\pi D v \tau}{\lambda z}}, \quad (2)$$

式中: J_1 表示一阶贝塞尔函数, D 为入瞳直径, v 为入射光处毛玻璃旋转的线速度, λ 为入射光波长, z 表示毛玻璃到成像系统入瞳的距离.

可求得散斑场的相干时间^[10],即每幅独立散斑场持续存在的平均时间为

$$\tau_c = \int_{-\infty}^{+\infty} |\mu_A(\tau)|^2 d\tau = \frac{8\lambda z}{3\pi^2 v D}. \quad (3)$$

在 CCD 的曝光时间 T 内,共采集到 $N = \frac{T}{\tau_c}$ 个完全不相关的独立散斑图样^[10]. 当采样数量 N 足够大时,根据散斑对比度 C 与独立散斑图样个数 N 的关系,可得:

$$C \propto \sqrt{\frac{1}{N}}. \quad (4)$$

由式(3)和(4)求得散斑对比度为

$$C = m \sqrt{\frac{8\lambda z}{3\pi^2 D T}} \cdot \sqrt{\frac{1}{v}}, \quad (5)$$

式(5)即为散斑对比度与成像系统各参量间的理论公式, m 为比例常数.

2 实验设计

依据式(5),成像系统中各参量除比例系数 m 和激光波长 λ 外均可由实验直接测得. 为更好地揭示动态散斑形成原理,选取散斑对比度 C 与漫

散体运动线速度 v 为测量变量,首先验证两者的平方反比关系,然后利用比例关系,求得未知光源的波长.

2.1 漫散体运动线速度 v 与散斑对比度 C 平方反比关系的验证

上述理论公式是基于毛玻璃始终沿某一方向移动,但是在光学平台上不容易实现,所以实验中可以采用旋转毛玻璃的方式. 毛玻璃运动的线速度为

$$v = \omega r, \quad (6)$$

其中, ω 为毛玻璃旋转的角速度, r 为入射毛玻璃的光场区域中心到旋转中心的距离.

在实验中需保证毛玻璃可以在一定转速范围内稳定转动,故采用步进电机驱动毛玻璃旋转,通过改变输入方波信号的频率可调控旋转角速度,并有如下关系式:

$$\omega = kf, \quad (7)$$

其中 $k = \frac{1}{12\ 800\pi}$ 为比例常数,由电机生产厂家给出, f 为输入方波信号频率. 由于 v 与 f 成正比,故后续实验直接验证 $C-f$ 的平方反比关系.

实验装置如图 3 所示,光源采用波长为 653.63 nm 的半导体激光器,毛玻璃的直径为 100.0 mm,厚度为 5.0 mm. 实验过程中,会聚透镜的后焦面与毛玻璃重合,毛玻璃上光场区域中心到旋转散射体中心的距离 r 保持 35.0 mm,CCD 的曝光时间 T 为 60 ms.

实验中以步进电机输入方波信号频率 f 作为自变量,在每一频率处用 CCD 采集 10 幅散斑图,并用维纳滤波器提取出散斑图像中各点的光强值,依据式(1)求出每幅图样散斑对比度 C_i ,将 10 组数据取平均,获得散斑对比度的均值 C . 以 25 Hz 等间隔改变输入方波信号频率得到 $C-f$ 数

据点,将数据输入 Matlab 中的 Curve fitting 工具箱进行曲线拟合.

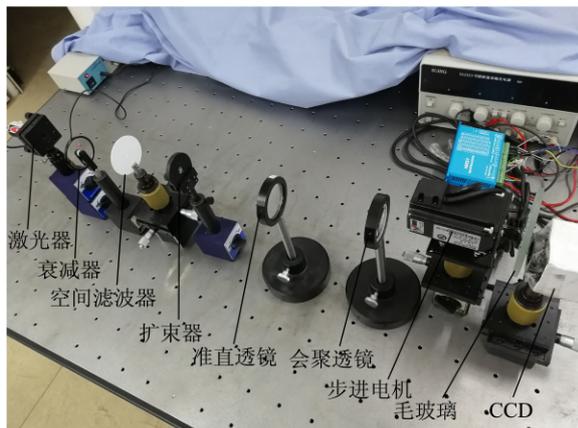


图 3 实验装置图

实验结果如图 4 所示,拟合的二次曲线 $C = 1.4803f^{-0.5} + 0.0144$ 与数据点之间的相关系数达到 0.9992,可以验证式(5)中散斑对比度和毛玻璃转速间的平方反比关系. 其中,拟合曲线中截距为表征激光波长、入瞳直径、毛玻璃到成像系统入瞳的距离、CCD 曝光时间、入射毛玻璃的光场区域中心到旋转中心的距离的综合参量,依据式(5),入射光波长 λ 与 C^2 呈正比关系.

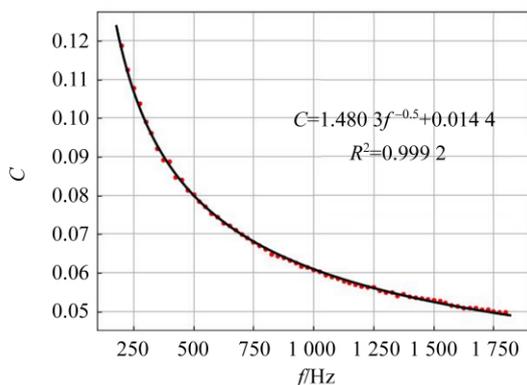


图 4 散斑对比度与输入方波信号频率的关系

由图 4 可以看出,随着毛玻璃转速逐渐增大,散斑对比度一直呈下降趋势. 当转速较低时,散斑对比度下降较快,随着转速上升散斑对比度下降趋于平缓. 因此在获取 $C-f$ 数据点时,应选取合适的转速范围,以获得曲线全貌.

2.2 基于 $C-f$ 曲线测量入射激光波长 λ 的实验设计

实验中,保持 CCD 到毛玻璃的距离 z 、在

CCD 上所成的圆光瞳的直径 D 、毛玻璃上光场中心到旋转中心的距离 r 、毛玻璃旋转线速度 v 均不变,利用不同光源对应的 $C-f$ 曲线拟合公式中斜率的比例关系,求得未知激光波长.

如图 5 所示,使激光出射口、分束镜上入射点、空间滤波器(即小孔光阑)形成三点一线系统. 实验时,让 2 束激光入射到分束镜上同一点,参考光的光斑中心已调节至与小孔光阑中心重合,调节待测激光器的俯仰角度,使得待测激光的光斑中心也与小孔光阑中心重合,确保 2 束激光在小孔光阑后的光路重合.

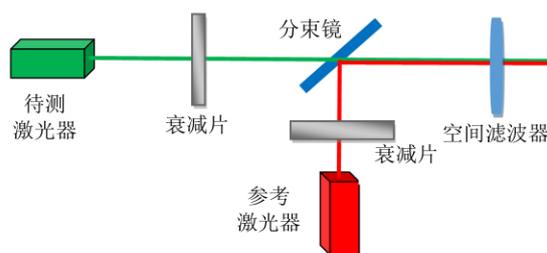


图 5 参量比对光路示意图

用 Ocean Optics USB4000 光谱仪对激光的波长进行标定. 标定结果为:红光参考激光器输出波长为 653.6 nm,绿光待测激光器输出波长为 514.1 nm.

实验中均以 653.6 nm 激光作为参考光,与验证 $C-f$ 关系的实验步骤相同,在 Matlab 中采用 $C = af^{-0.5} + b$ 的形式拟合 $C-f$ 关系曲线,求出 653.6 nm 激光所对应的拟合系数 a_1 ,用同样的方法可求出待测激光所对应的拟合系数 a_2 ,如表 1 所示,求得 $\bar{a}_1 = 0.8075$, $\bar{a}_2 = 0.7174$. 由式(5)可知,波长 λ 与斜率 a 平方成正比关系,即可利用此比例关系求出待测激光的波长.

表 1 参量 a 对比表

实验次数	a_1	a_2
1	0.8008	0.7098
2	0.8061	0.7209
3	0.7918	0.7163
4	0.8169	0.7252
5	0.8356	0.7177
6	0.8025	0.7122
7	0.8108	0.7022
8	0.7954	0.7346

由 $\lambda_2 = \lambda_1 \frac{\bar{a}_2^2}{a_1^2}$, 可求得 $\lambda_2 = 515.9 \text{ nm}$, 测量的相对偏差为 0.36% 。

实验中采用实验数据拟合曲线的方法计算出与激光波长相关的参量 a , 由参量 a 的比例关系和参考激光波长求解出待测激光波长, 这种方法可充分利用每个数据点, 减小随机误差。

实验设计为测量激光波长提供一种全新的思路, 用于测量激光波长的装置在用参考激光做好标定后, 只需在固定转速下旋转毛玻璃。用该方法进行波长测量的突出优点是: 装置简单, 装配容易, 无需精密调节各元件间隔, 可由后续标定校准; 成本低廉, 采用已发展成熟的步进电机和工业 CCD 即可完成测量任务。

3 结 论

利用动态散斑测量激光波长, 采用在成像系统中添加旋转的毛玻璃的方法产生动态散斑, 总结出散斑对比度与成像系统各参量间的理论公式, 选择可准确定量控制的毛玻璃转速为探究变量, 由此建立散斑对比度与毛玻璃转速间的平方反比关系。在波长测量实验中采用以分束镜为主的辅助光路进行控制变量, 并用光谱仪标定激光波长, 由 C - f 曲线斜率的比例关系测量未知激光波长。其中, 验证 C 与 v 关系的实验中, C 与 $1/\sqrt{v}$ 线性相关系数可达 0.999 ; 波长测量实验中测量相对偏差低于 1% 。可见实验结果与理论推导公式有很好的—致性。

参考文献:

- [1] Tao B, Lei Q C, Ye J F, et al. Measurements and analysis of diode laser modulation wavelength that high accuracy and response rate [J]. Applied Physics B, 2020, 126(4): 88.
- [2] Senaa A W, Hapiddin A, Ratnaningsih, et al. Optical wavelength meter calibration using iodine stabilized He-Ne laser by direct measurement method [J]. Procedia Engineering, 2017, 170(4): 363-368.
- [3] Dobosz M, Kożuchowski M. Interference comparator for laser diode wavelength and wavelength instability measurement [J]. Review Scientific Instruments, 2016, 87(4): 043115.
- [4] Tian Z S, Sun Z H, Zhang Y C, et al. Research on laser wavelength measurement with rotating Fabry-Perot mirror [J]. Optical Engineering, 2014, 53(7): 074107.
- [5] 朱道云, 何艳阳, 周誉昌. 利用激光超声光栅衍射光谱测定汞光的波长 [J]. 大学物理, 2010, 29(9): 40-41.
- [6] 杨燕婷, 王敏, 周誉昌. 用超声光栅测量氦氖激光的波长 [J]. 大学物理, 2009, 28(7): 43-44, 52.
- [7] 涂桥, 于瀛洁, 周文静. 基于旋转毛玻璃片的全息系统去噪处理 [J]. 光学仪器, 2014, 36(4): 337-341.
- [8] 张佳莹, 王红军, 朱学亮, 等. 毛玻璃转速对干涉条纹成像质量的影响 [J]. 光电工程, 2018, 45(1): 28-33.
- [9] Morris M N, Naradikian M, Millerd J. Noise reduction in dynamic interferometry measurements [C]//Proceeding of SPIE. 2010: 7790.
- [10] 徐建程, 刘志超, 杜薇薇, 等. 带旋转毛玻璃干涉成像系统的统计分析 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 702-706.
- [11] Tziraki M, Jones R, French P M W, et al. Photorefractive holography for imaging through turbid media using low coherence light [J]. Applied Physics B, 2000, 70(1): 151-154.
- [12] Chen C Y, Su W C, Lin C H, et al. Reduction of speckles and distortion in projection system by using a rotating diffuser [J]. Optical Review, 2012, 19(6): 440-443.
- [13] Li J. Design of optical engine for LCOS laser display with rotated diffuser plate [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2013, 55(1): 138-141.
- [14] Stangner T, Zhang H Q, Dahlberg T, et al. Step-by-step guide to reduce spatial coherence of laser light using a rotating ground glass diffuser [J]. Applied Optics, 2017, 56(19): 5427-5435.
- [15] Goodman J W. Statistical properties of laser speckle patterns [J]. Laser Speckle and Related Phenomena, 1975, 9: 9-75.
- [16] Freund I, Joseph W. Goodman: Speckle phenomena in optics: Theory and applications [J]. Journal of Statistical Physics, 2008, 130(2): 413-414.
- [17] 梁传祥. 激光投影显示光学系统关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.

Laser wavelength measurement based on dynamical speckles

YAN Song-ming^a, YIN Wen-hang^a, WANG Jing^b

(a. School of Instrumentation Science and Opto-electronic Engineering;

b. School of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A teaching experiment of laser wavelength measurement based on dynamical speckles was designed. The dynamical speckles were formed by rotating ground glass. Under principle analysis, the influence parameters of speckle contrast in imaging system were determined, and the relationship curve about speckle contrast and rotational speed of the ground glass was measured. According to the curve, the linear relationship between the speckle contrast and the reciprocal of the square root of the rotating speed of the ground glass at the point of incident light was well; the output wavelength of the laser was measured by the proportion between the square of the curve slope of the curve and the incident light wavelength with the help of reference parameter.

Key words: laser wavelength; dynamical speckle; rotating diffuser; imaging system

[责任编辑:郭 伟]

欢迎订阅 欢迎投稿

《物理实验》是由教育部主管、东北师范大学主办的学术期刊,是教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会会刊,是中国高等学校实验物理教学研究会副秘书长单位,是高等学校物理演示实验教学研究会常务理事单位。本刊宗旨主要是交流物理实验研究成果,介绍国内外物理实验教学经验,培养读者的科学精神与创新能力,引领我国物理实验教学的改革与发展。杂志着重刊载对物理实验教学改革与发展具有前瞻性,对实验教学的具体问题具有指导性,对新科技成果应用于实验教学具有深度融合性,对传统实验内容具有拓展性和创新性的论文。目前开设的主要栏目有:前沿导读、近代与综合实验、扩展与应用、普通物理实验、教学论坛、专题、互联网+物理、学生园地、基础教育等。《物理实验》适合于物理实验工作者、理工科学生以及教学仪器研制技术人员阅读。

《物理实验》为月刊,全国各地邮局均可订阅,邮发代号为 12-44。若错过邮局订阅时间,可直接与编辑部联系。

物理实验杂志