

光学瞄具宽光谱透射率检测及误差影响因素分析

柳 鸣 张国玉 安志勇 王劲松 夏 洋

长春理工大学, 吉林 长春 130022

摘要 透射率参数是评价光学瞄具成像亮度和清晰程度的重要参数,介绍了一种高精度的光学瞄具宽光谱透射率的检测系统。针对检测过程中影响检测精度的因素包括偏振的敏感性、光束偏移、系统的杂散光、探测器的非线性和空间均匀性,结合验证实验和光学模拟软件(tracepro)给出定量的分析以及仪器的合成不确定度。对于探测器非线性误差利用最小二乘法原理予以修正。标定实验表明,可见光波段的透射率测量误差小于0.35%,近红外波段透射率测量误差小于0.65%。

关键词 测量;光学瞄具;透射率检测;影响因素分析;最小二乘法

中图分类号 TH745 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.061201

Optical Transmissivity Detection with Wide Spectrum for Optic Aiming Device and Analysis of Its Influencing Factors

Liu Ming Zhang Guoyu An Zhiyong Wang Jinsong Xia Yang

Changchun University of Science, Jilin, Changchun 130022, China

Abstract Optical transmissivity parameter is an important parameter in evaluating the optic aiming device's imaging luminance and clarity. This paper introduces an optical transmissivity detection system with a wide spectrum coverage and high precision for the aiming device, which is mainly applied to the production and test process of the aiming device. Focused on influencing factors on the measurement accuracy in the detecting process including polarization, beam displacement, stray light, spatial uniformity and nonlinearity of detector, quantitative analyses by verification tests or tracepro simulations and combined standard uncertainty of high-accuracy measurement for spectral transmissivity are presented. According to the nonlinear error of detector, a correction is carried out by using the principle of least square method. The results of the calibration experiment have proved that the accuracy of transmissivity parameter in visible and infrared bands arrive at 0.35% and 0.65%, respectively.

Key words measurement; optic aiming device; optical transmissivity detection; analyses of influencing factors; least square method

OCIS codes 120.4640; 120.7000; 230.0250; 250.0040

1 引言

光学瞄具透射率参数即瞄具的出射光通量与入射光通量的比值,反映了光能量经过瞄具光学系统时由于光学元件反射、吸收、气泡、表面污物、疵病和镀膜所造成的损失程度,其直接影响瞄具瞄准精度^[1]。传统的光学透射率测试均采用单通道光学测量方法,这种方法无法消除背景噪声且无法保证实测与空侧时光源强度的一致性,而且误差较大,一般精度为 $\pm 3\%$ 。

依据测试需求,光学瞄具透射率检测系统的测量光谱范围为300~1700 nm,即覆盖可见光与近红外波段的检测。测量系统采用双通道测试方法,消除了由于光源电压的不稳定所引起的系统测量误差^[2]。采用传光光纤耦合光束以提高光强传输质量,使用斩波盘对测量光束进行光强调制,利用锁相放大器提取微弱信号^[3-5]。

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-18; 网络出版日期: 2014-05-20

作者简介: 柳 鸣(1988—),男,博士研究生,主要从事精密测控技术与仪器方面的研究。

E-mail: liuming2525775@126.com

导师简介: 张国玉(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电仪器与检测技术等方面的研究。

E-mail: zh_guoyu@163.com

随着用户对检测精度要求越来越高,对影响检测精度的误差来源与相应不确定度的分析尤为重要。本文对检测过程中影响测试精度的各项因素如偏振敏感性、瞄具重复装卡时引起的光束偏移、杂散光、探测器的非线性 and 空间敏感性进行分析,并逐项进行测试实验,量化不确定度大小,对于其中影响较大的因素做出修正。研制的检测系统可广泛应用于瞄具、望远镜、照相物镜等光学系统和镜片、晶体等光学元件的透射率测试。

2 反射式双通道透射率检测原理

为实现高精度透射率参数的测量要求,剔除光源和电源电压的波动所带来光源光强不稳定,系统采用了反射式双通道检测方法,系统检测工作原理如图1所示。反射镜1通过伺服机构可以旋转一定角度,位于图示虚线位置时,适用于可见光波段透射率检测,位于实线位置时则适用于近红外波段透射率检测。光源发出的光束经反射镜2入射到离轴抛物反射镜后准直扩束,经斩波盘光学调制后分光,一部分光束经平凸透镜会聚后再经传光光纤倾斜入射到探测器表面作为参考光。另一部分光经过被测瞄具后再经非球面聚光镜会聚光束于探测器表面作为测量光。探测器输出两个交变的信号,与光电开关探测的分频信号比较后分光,再经锁相放大、A/D转换后输出稳定的电压幅值。

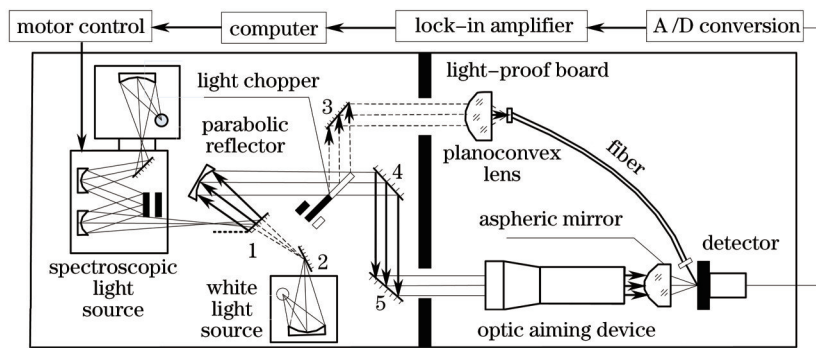


图1 系统工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of system principle

通常光谱透射率定义为透射光光强与入射光光强之比^[6],由探测器的响应度方程可知探测器接收光强与输出电压幅值成线性关系^[7-8]。所以透射率参数可表示为

$$\tau(\lambda) = \frac{(U_2 - U_0)/U_4}{(U_1 - U_0)/U_3}, \quad (1)$$

式中 U_1 , U_3 分别为空测时测量光路探测器输出的电压幅值和参考光路探测器输出的电压幅值; U_2 , U_4 分别为光学瞄具放置于检测系统后,测量光路探测器电压幅值和参考光路探测器电压幅值; U_0 为探测器自身的本地噪声。

3 误差影响因素分析

3.1 偏振特性的影响

检测系统采用中性滤光片减弱测量光路的参考光强以避免探测器出现饱和现象。但由于滤光片容易导致光线中出现偏振现象,为确定偏振现象引起的透射率参数检测的测量误差,可从菲涅耳定律中进行分析,并做了如下实验:首先,将偏振起偏棱镜放置于探测器前方,使其光轴方向垂直于入射光线,此时的检测的透射率参数为 T_v 。然后将偏振棱镜旋转 90° ,此时检测的透射率参数为 T_h 。偏振度可表示为

$$p = \left| \frac{T_v - T_h}{T_v + T_h} \right|. \quad (2)$$

反复经过上述实验,偏振度 p 的变化为 $0.08 \sim 0.28$ 。根据菲涅耳公式即可得出,当入射光线小于 1° 时,由偏振度 $p=0.3$ 所引起的不确定度为 0.175% 。

3.2 光束偏移的影响

瞄具在重复装卡时会带来出射光束在子午和弧矢两个方向的偏移,尤其当被测瞄具变焦倍数较大时,出射光束偏移空间角度会成倍增加。为确定光束偏移所带来的不确定度,做了如下实验:被测瞄具、平面反

射镜、光电式自准直仪依次放置,反射镜由机械转接结构与瞄具连接,使得其空间状态与瞄具物镜一致。重复装卡10次并检测这10次的透射率参数,从CCD中观察重复装卡时瞄具物镜空间偏移量。检测原理图如图2所示。经实验测得的透射率参数标准差 $\sigma_T = 0.01\%$ 。由此可以得出:重复装卡时子午方向的光束的偏移 $(-1'26'' - 0'57'')$ 与弧矢方向的光束偏移 $(-1'08'' - 2'42'')$ 所带来的不确定度为 $u_T = \sigma_T = 0.01\%$ 。

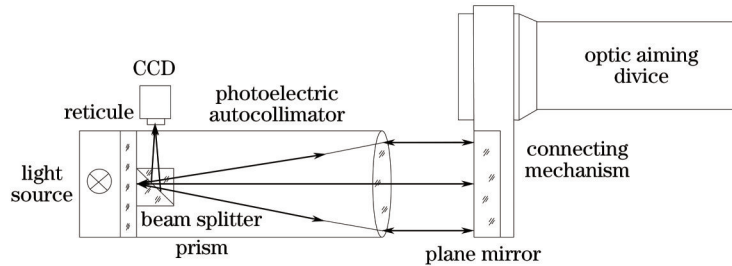


图2 装卡误差检测原理图

Fig.2 Testing principle diagram of mounting error

3.3 杂散光的影响

杂散光指的是光束在系统各组成元件中传播时产生的有害辐射。其主要发生在反射镜与斩波盘之间、设备外罩与光学平台之间、遮光板与探测器之间。借助光学模拟软件(tracepro)即幅射度分析软件可以模拟出系统光路并分析出系统内反射引起的不确定度。设备外罩、遮光板、斩波盘、光学平台表面均设置为氧化铝的反射系数。光束照射至系统各元件表面后在除反射外其余光束全部吸收的理想情况下,瞄具放置前和放置后探测器表面接收光通量分别为74.717 lm和49.445 lm。探测器表面接收光通量仿真情况如图3所示。存在杂散光的情况下,瞄具放置前和放置后探测器表面接收光通量分别为81.834 lm和54.131 lm。由上述仿真分析可以得出由杂散光引起的不确定度为0.01%。

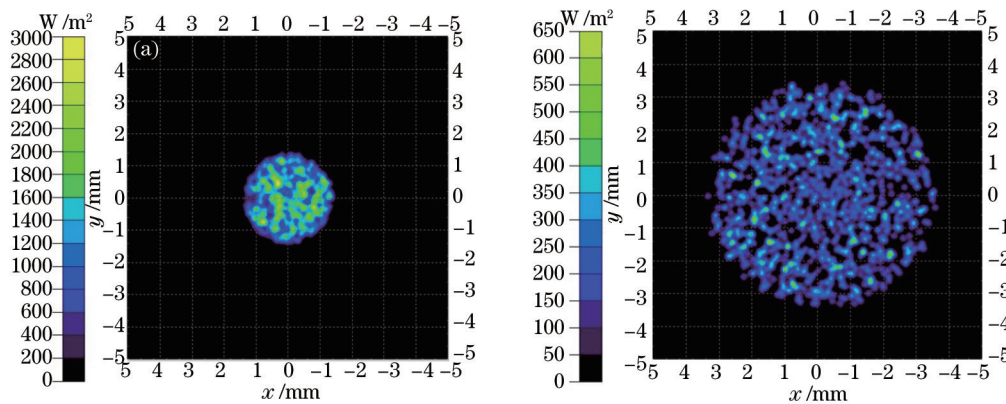


图3 理想情况光通量对比。(a) 放置瞄具前;(b) 放置瞄具后

Fig.3 Luminous flux comparison in ideal state. (a) Without placing aiming device; (b) with placing aiming device

3.4 探测器空间均匀性的影响

探测器垂直于入射光线放置并在水平面内沿 x,y 方向以0.1 mm步长移动,记录下此时探测器的输出电压幅值如图4所示。当探测器相对于入射孔径中心平移0.5~0.5 mm时,其响应的均方根误差为0.176%。

3.5 非线性的影响及修正

系统的测量原理是基于探测器检测特定波长的光强度比值,所以探测的非线性误差将直接影响最终的透射率参数的测量结果。探测器的响应度方程为

$$\frac{Mq\eta}{h\nu} = \frac{V}{I}, \quad (3)$$

式中 η 为量子效率, M 为光电二极管的倍增因子, q 为迁移电子电荷, ν 为入射光频率, h 为普朗克常数, V 为输出电压幅值, I 为探测光强,将 $\frac{Mq\eta}{h\nu}$ 定义为 R 即探测器的响应度,若探测器绝对理想,则 R 为一个固定的常数。

将8块石英平晶镀上透射率为10%~90%的增透膜(误差为 $\pm 1 \times 10^{-3}$),放置于系统中原被测瞄具在测量

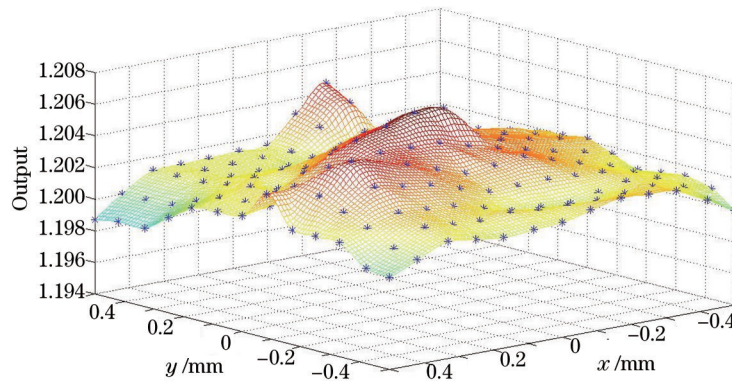


图4 探测器空间均匀

Fig.4 Spatial uniformity of the detector

光路中的位置来检测其透射率参数。经实验验证,由探测器的非线性所引起的不确定度为0.42%。对于高精度的透射率检测系统是不可忽视的,必须加以修正。对上述实验结果采用最小二乘法原理^[9-12]对实验数据进行处理,拟合非线性响应度方程。设拟合曲线为八次多项式 $P_8(y_i) = a_0 + a_1x + \dots + a_8x^8$, 其中 y 为修正真值, x 为真实测量值。测量误差的平方和为

$$Q(a_0, a_1, \dots, a_8) = \sum_{i=1}^8 [y_i - P_8(x_i)]^2. \quad (4)$$

为使其残差和最小,令 $Q(a_0, a_1, \dots, a_8)$ 对多项式的各项系数分别求偏导数为零。求解方程,即可得出非线性响应度方程

$$P(\lambda_{\text{visible}}) = -2.0204 \times 10^{-9} x^6 + 5.7694 \times 10^{-7} x^5 - 6.0852 \times 10^{-5} x^4 + 0.0029 \times 10^{-3} x^3 - 0.05932x^2 + 1.2825x - 3.1863, \quad (5)$$

$$P(\lambda_{1540 \text{ nm}}) = -2.6319 \times 10^{-11} x^7 + 9.6843 \times 10^{-9} x^6 - 1.4224 \times 10^{-6} x^5 + 1.0552 \times 10^{-4} x^4 - 4.0985 \times 10^{-3} x^3 + 0.0772x^2 + 0.4731x - 1.8464. \quad (6)$$

拟合后的非线性响应度方程的均方根误差分别为0.21%和0.23%,有效修正了系统误差,减小由探测器的非线性所带来的不确定度。将修正方程带入上位机程序,即可完成修正。

3.6 不确定度的合成

根据上述不确定度来源的分析,可估算最终仪器的合成不确定度。系统合成不确定可表示为

$$u_o = \sqrt{\sum_{i=1}^N (u_{xi})^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \rho_{ij} u_{xi} u_{xj}}, \quad (7)$$

式中 u_o 为合成不确定度, u_{xi} 为各项不确定源的不确定大小。其中各项不确定度相互独立,所以相关系数 $\rho_{ij} = 0$, (7)式改为

$$u_o = \sqrt{\sum_{i=1}^N (u_{xi})^2}. \quad (8)$$

根据(8)式得出光学瞄具透射率参数检测系统可见光波段的综合不确定度为0.33%,近红外波段下的综合不确定度为0.63%,表1为光谱透射率检测的不确定度以及综合不确定度。

表1 瞄具透射率参数检测不确定度源

Table 1 Uncertainty components for aiming device's transmissivity detection

Uncertainty component	Uncertainty	
	Visible band	Infrared band
Polarization	0.00175	0.0033
Beam displacement	0.0001	0.0028
Stray light	0.0006	0.0003
Spatial uniformity of detector	0.00176	0.0041
Detector linearity	0.0021	0.0023
Overall uncertainty as root sum of squares	0.0033	0.0063

4 检测系统标定

在实验室中采用标准融合晶体透射率片对检测系统进行精度标定试验,装置如图5所示。融合晶体透射率片经日本岛津分光光度计标定,其透射率检测精度可达 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。标定结果如表2所示,试验结果表明,系统在可见光波段的透射率参数测试误差小于0.35%,近红外波段的透射率参数测试误差小于0.65%,在检测光谱波段范围300~1700 nm的情况下与分析结果一致且达到了设计要求,测量精度高于传统单通道测试方法的一般精度,本方法减小了由于光源不稳定性所带来的检测误差。

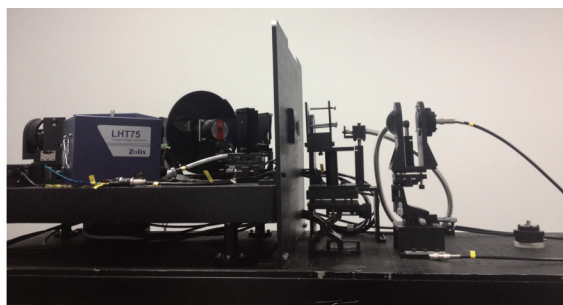


图5 标定实验装置图

Fig.5 Experimental device of the calibration testing

表2 透射率参数检测系统标定结果

Table 2 Calibration results for aiming device's transmissivity detection

Wavelength	Type	No.1	No.3	No.5	No.7	No.9
300~700 nm	(Standard value) T_{visible}	12.08%	31.25%	50.22%	72.59%	93.11%
	(Average value) $T_{\text{visible}\bar{M}}$	12.17%	31.30%	51.29%	72.65%	93.09%
	(Standard deviation) σ_{visible}	0.13%	0.22%	0.34%	0.22%	0.21%
1064 nm	(Standard value) T_{1064}	13.20%	31.58%	60.23%	80.47%	93.37%
	(Average value) $T_{1064\bar{M}}$	13.46%	31.80%	60.16%	80.16%	93.40%
	(Standard deviation) σ_{1064}	0.32%	0.41%	0.22%	0.42%	0.17%
1540 nm	(Standard value) T_{1540}	15.08%	34.19%	63.21%	82.49%	93.58%
	(Average value) $T_{1540\bar{M}}$	15.27%	34.36%	63.45%	82.66%	93.60%
	(Standard deviation) σ_{1540}	0.22%	0.21%	0.57%	0.35%	0.07%

5 结 论

研制了一种反射式双通道的宽光谱检测系统,在对光学瞄具透射率检测原理分析和阐述的基础上对系统中存在的影响检测精度的因素进行了分析和实验验证,并对探测器的非线性误差予以修正。最终对系统进行了标定实验,结果表明,该系统实现了300~1700 nm宽光谱范围内的透射率测量,可见光波段的检测精度可达0.34%,近红外波段的检测精度可达0.645%。研制的光学瞄具宽光谱透射率检测系统可实现多品种多孔径的瞄具测量,具有高精度、宽光谱覆盖等优点,对瞄具的生产、测试,光学元件的加工和检测具有重要的实际意义。

参 考 文 献

- 1 Wang Jinsong, An Zhiyong, Li Hailan. Research on the measuring method to the IR aiming sight's sight line alteration of reflection type collimator[J]. Acta ArmamentarII, 2010, 31(11): 1422-1425.
王劲松, 安志勇, 李海兰. 反射式平行光管的红外瞄具零位走动量测量方法研究[J]. 兵工学报, 2011, 31(11): 1422-1425.
- 2 H Nasibov, I Mamedbeili, D Riza. High-precision measurements of reflectance, transmittance and scattering at 632.8 nm [C]. SPIE, 2012, 8433: 843313.
- 3 He Lingping, Chen Bo, Yang Lin, *et al.*. In situ optic measuring technique based on virtual lock [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1677-1681.
何玲平, 陈波, 杨林, 等. 基于虚拟锁相的原位光学测量技术[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1677-1681.
- 4 Li Chenxi, Zhao Huijuan, Wang Qiuyin, *et al.*. A near infrared multi-wavelength optical properties measurement

- system based on double-integrating-spheres and lock in detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(7): 1811-1815.
- 李晨曦, 赵会娟, 王秋殷, 等. 基于双积分球和锁相放大测量的近红外多波长光学参量测量系统的研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(7): 1811-1815.
- 5 Xu Han, Lu Qipeng, Piao Renguan. Research of near-infrared spectrum detecting circuit with LIA[J]. *Microcomputer Information*, 2009, 25(8-2): 233-235.
- 徐 晗, 卢启鹏, 朴仁官. 基于锁相放大的近红外光谱信号提取电路研究[J]. *电子设计*, 2009, 25(8-2): 233-235.
- 6 Feng Qibo. *Optical Measurement Techniques and Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. 162-165.
- 冯其波. *光学测量技术与应用*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. 162-165.
- 7 J Cheung, J L Gardner, A Migdall, *et al.*. High accuracy dual lens transmittance measurements[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(22): 5396-5397.
- 8 J Campos, A Corrons, A Pons, *et al.*. Spectral responsivity uncertainty of silicon photodiodes due to calibration[J]. *Meas Sci and Technol*, 2001, 12(11): 1926-1931.
- 9 Cheng Wansheng, Zhao Jie, Cai Hegao. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 314-318.
- 程万胜, 赵 杰, 蔡鹤皋. CCD像素响应非均匀的校正方法[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(2): 314-318.
- 10 Ma Hong, Wang Jinbo. *Theory of Instrument Accuracy*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2009. 127-129.
- 马 宏, 王金波. *仪器精度理论*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009. 127-129.
- 11 费业泰. *误差理论与数据处理*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. 87-88.
- 12 X Gong, M Tong, Y Xia, *et al.*. High detectivity polymer photodetectors with spectral response from 300 nm to 1450 nm [J]. *Science*, 2009, 325(5948): 1665-1667.