

# 利用光束后向散射提高激光跟踪发射精度方法

薛向尧, 高云国

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为提高激光跟踪发射系统激光发射指向精度, 提出了一种通过测量发射激光后向散射光尖来修正激光发射指向误差的方法。在介绍系统光机结构及后向散射相关理论的基础上详细论述了光尖探测距离与视差的关系, 根据天气情况和长期测量经验获得良好天气、中等天气和较差天气三种天气状况下光尖探测距离, 进一步得出三种天气状况下视差修正量。在良好天气状况下, 利用预定空间轨迹误差修正方式进行实验验证, 对比光束后向散射法与靶板测量法所测得的激光发射指向精度, 在预定的空间轨迹上两者测量误差为 $2.5''$ , 实验证明, 利用光束后向散射法可以大大提高激光发射的指向精度。

**关键词:** 激光指向精度; 后向散射; 光尖测量; 误差修正

中图分类号: TH744.5 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)08-2003-05

## Improvement method of laser pointing accuracy for the tracking and lasing system by backward scattering

Xue Xiangyao, Gao Yunguo

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

**Abstract:** In order to correct laser beam pointing error for the high accuracy tracking and lasing system, a laser beam tip measurement method of laser backward scattering was developed. Firstly, the opto-mechanical structure and the backward scattering theory were introduced, and the relationship between detect distance of laser beam tip and binocular parallax was analysed. Secondly, based on the long time observation, the detect distances of laser beam tip in good weather condition, medium weather condition and bad weather condition were obtained respectively. Finally, the validating experiment of laser beam tip measurement method by targeting method in predetermined orbit was carried out in good weather condition. The difference of two methods was  $2.5''$ , which indicates that laser beam pointing accuracy could be improved greatly by the laser beam tip measurement method.

**Key words:** laser pointing accuracy; backward scattering; beam tip measurement; error correction

## 0 引言

近年来,随着激光测距技术的不断发展,发射激光束对作用目标的跟踪精度要求越来越高,特别是在空间领域的激光应用场合,对光束指向精度有着更高的要求<sup>[1-3]</sup>。

由于激光发射要经过激光发射结构,其中包括静态和动态光学导光元件,由于这些元件的加工装调误差,在目标跟踪器跟踪目标运动时,带来发射激光光轴与目标跟踪光轴随指向的不同而变化的平行度偏差,该偏差严重影响了激光发射的指向精度<sup>[4]</sup>,如何提高激光发射的指向精度是迫切需要解决的问题。

文中利用光束后向散射法测量激光发射的指向精度,根据光尖探测距离与视差的关系,由天气情况和长期测量经验获得良好天气、中等天气和较差天气状况下光尖探测距离,得出视差修正量,并利用靶板测量法对该方法进行了对比实验验证。

## 1 利用激光后向散射提高激光跟踪精度方法

一般情况下,激光跟踪发射系统是由目标跟踪器、激光器、跟踪架、激光发射结构组成,如图 1 所示。目标跟踪器安装在跟踪架上,激光器安装在跟踪架下,激光束通过激光发射结构传导到跟踪架上与目标跟踪器光轴平行发射,目标跟踪器和激光发射结构安装位置如图 2 所示。目标跟踪器对目标进行跟踪的同时,由激光发射结构发射激光到达目标。

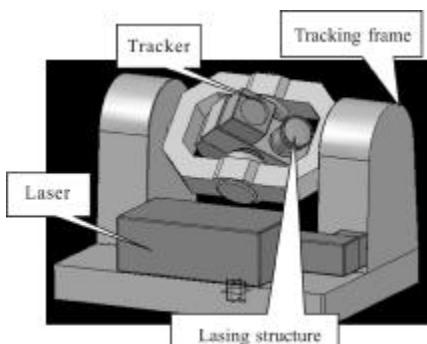


图 1 激光跟踪发射系统

Fig.1 Tracking and lasing system

当激光发射通过大气通路时,激光辐射与大气中分子和气溶胶粒子之间相互作用产生各种物理过程,包括分子的瑞利散射,气溶胶粒子的米散射等

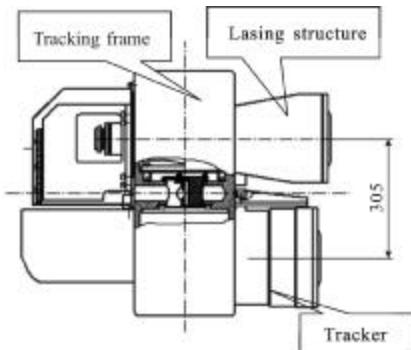


图 2 四通安装点位置图

Fig.2 Tracking and laser transmitter locations in four-way structure

多种散射过程,即大气对激光的后向散射<sup>[5]</sup>。这种后向散射光直接代表了发射激光的出射方向。由于目标跟踪器探测波段与发射激光波段重合,在目标跟踪器上可以显示出发射激光后向散射光柱,如图 3 所示。如能准确测量后向散射光的方向和后向散射最远发光段的距离,就可以对发射激光光轴和跟踪探测光轴平行度进行精标定,进行误差修正。

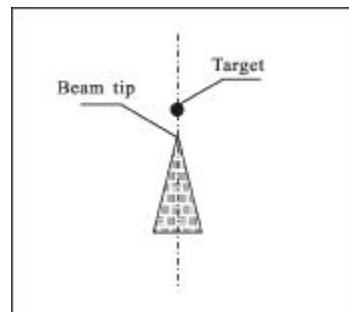


图 3 后向散射光尖图形

Fig.3 Beam tip figure of laser backward scattering

后向散射光强、弱与大气能见度、温度、湿度等气象条件关联非常密切,气象条件直接影响到可探测的后向散射光的强弱和远近<sup>[6-7]</sup>,通过后向散射光尖端测量,可以得到后向散射光的最远发光段在探测器视场位置,但仅凭跟踪探测器信息无法得到最远发光段的距离,最远发光段距离的获得成为精标定的关键问题。

解决上述问题传统的方法是采用各种天气大气透过率模型,估算大气介质所受激光的照度,进而计算目标跟踪器接收的后向散射激光辐射强度,根据目标跟踪器能够探测到最小辐射强度值,反推可探测激光距离。

距离发射系统 L 处的大气介质照度为:

$$E(\lambda_0, L) = \frac{E_0}{\pi S(L)} \exp \left[ - \int_0^L \sigma(\lambda_0, L') dL' \right] \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为激光发射功率;  $S(L)$  为  $L$  处激光光束的截面积;  $\sigma(\lambda_0, L)$  为  $L$  处的大气消光系数。

目标跟踪器接收的后向散射激光辐射强度为:

$$I(L_1, \theta, \lambda_0, \lambda_s) = E(\lambda_0, L) \beta(L_1, L, \theta, \lambda_0, \lambda_s) V(L_1, L) \quad (2)$$

式中:  $V(L_1, L)$  为目标跟踪器视场包含的被激光照射的散射介质体积;  $\beta(L_1, L, \theta, \lambda_0, \lambda_s)$  为所接收的散射体散射截面积。

这种方法计算参数获取很困难、计算复杂,且接收系统往往为能量接收系统,如雪崩管等。文中目标跟踪器为光学成像系统,激光光谱波段被包含在目标跟踪器探测波段里,按照理论计算的散射辐射强度往往被淹没在背景噪声里。因此,对距离的估算也无法评价,导致误差修正不准确。

如果能较准确地估计光尖的锥尖所代表的发射激光发光段的距离范围,就可以对视差进行较准确的修正,以解决较精确测量激光方向的难题。

实际上,可以根据天气情况和长期测量经验,估算后向散射光光尖距离。对同一探测器而言,天气和激光束性能决定了发射激光最远可探测距离,激光束性能基本可以考虑为固定值,因此天气情况成为影响探测后向散射光光尖距离的主要因素。当天气不好时,近距离后向散射光到探测器的光信号会很强,由于探测器动态响应范围限制,远距离后向散射光图像将被淹没,无法看到;当天气好时,近距离后向散射光到探测器的光信号会变弱,在探测器动态响应一定时,可以看到更远的发射激光后向散射光图像。

根据当地长期观测经验,总结了在不同天气情况下的探测距离,如表 1 所示。

表 1 各种天气状况可探测光尖距离表

Tab.1 Detection distance of beam tip in various weather conditions

Weather condition	Detection distance L/km	Average value of L/km
Good weather	8~12	10
Medium weather	5~8	6.5
Bad weather	3~5	4.5

采用光束后向散射法测量激光发射指向精度时,一般取平均可探测距离来分析计算,但根据长期观测结果,在三种天气状况下,平均可探测距离与实际探测距离之间存在约  $\pm 2 \text{ km}$ 、 $\pm 1.5 \text{ km}$  和  $\pm 0.5 \text{ km}$  的误差。该误差将导致激光发射轴与目标跟踪轴之间视差的计算偏差,最终影响测量精度。

根据不同探测距离,由激光发射结构和目标跟踪器的安装距离引起的视差计算如下:

$$\alpha = \arctan \frac{A}{L} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为安装距离引起的视差角;  $A=305 \text{ mm}$  为激光发射结构和目标跟踪器的安装距离;  $L$  为发射激光最远可探测发光段距离。

各种距离引起的视差计算如表 2 所示。

表 2 各种距离下视差计算表

Tab.2 Binocular parallax value in various distance

Detect distance L/km	Fixing distance A /mm	Binocular parallax $\alpha$ /(")
3	305	21
5	305	12.6
10	305	6.3
15	305	4.2
20	305	3.2
25	305	2.5
30	305	2.1

可探测距离与视差的关系曲线如图 4 所示。

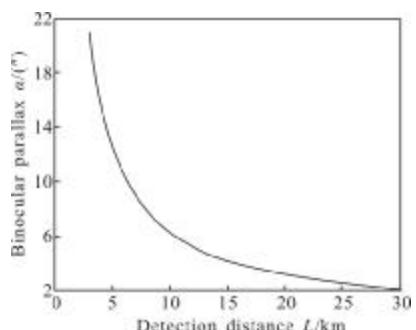


图 4 可探测距离与视差关系曲线

Fig.4 Relationship between detection distance and binocular parallax

由图 4 可以看出,可探测距离与视差的关系成非线性变化,曲线斜率随可探测距离的增大迅速减

小,说明可探测距离越大,视差变化越小。由表 2 的计算结果可得,在 4.5 km 附近,距离变化 1 000 m,视差变化 5";在 6.5 km 附近,距离变化 1 000 m,视差变化 1.5";在 10 km 附近,距离变化 1 000 m,视差变化 0.5"。因此,在良好天气状况下,视差计算误差为±1";在中等天气状况下,视差计算误差为±2",在较差天气状况下,视差计算误差为±2.5",说明采用光束后向散射法测量激光发射指向精度受天气状况影响较大,应尽量在良好天气状况下进行测量。

## 2 试验检测

根据以上分析,采用水平式两轴跟踪发射转台进行激光后向散射测量试验。

利用激光后向散射测量对激光发射指向精度进行误差修正可分为两种方式:

### (1) 预定空间轨迹误差修正

预定空间轨迹误差修正需要事先对预定空间轨迹进行光尖误差测量,在对目标进行跟踪和激光发射时,逐点进行误差修正。该方法由于误差测量时没有跟踪目标,对光尖位置测量更精确。

### (2) 适时跟踪误差修正

适时跟踪误差修正是在对目标跟踪激光发射同时完成光尖位置的测量和误差修正。该方式由于要同时对目标和光尖进行跟踪和图像处理,实现的技术难度较大,对激光发射指向修正精度较低。

文中在良好天气状况下,采用第一种预定空间轨迹误差修正方式进行试验验证。试验验证结构如图 5 所示。

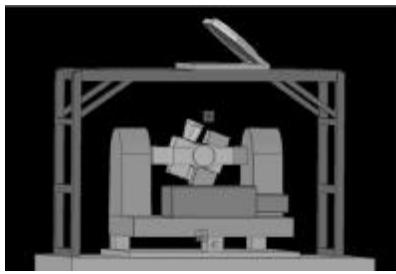


图 5 激光发射试验验证结构

Fig.5 Structure of verification system for lasing experiment

目前,光尖误差修正没有准确的标定方法,特别是对天顶远距离目标更是如此。为了验证光尖误差修正精度,采用如图 5 所示结构,安装天顶大平面反

射镜,将目标探测和激光发射光轴转到水平方向,在距离 7 km 处设立靶板,通过对靶板目标瞄准和激光光斑着靶位置,计算确定激光发射指向位置。试验得到在预定轨迹上光尖分别在方位 A、俯仰 E 方向的指向  $A_b, E_b$  和靶板验证测量计算值  $A_t, E_t$ ,如表 3 所示。

表 3 激光发射指向精度测量数据值

Tab.3 Measured value of laser pointing error

Longi- tude /(°)	Latit- ude /(°)	Measured value of beam tip/(")		Measured value by target board /(")		ErrorΔ/(")	
		$A_b$	$E_b$	$A_t$	$E_t$	$\Delta_A$	$\Delta_E$
10	-2.2	-10.6	-14.8	-9.8	-13.8	0.8	1
7.5	-2.4	-9.4	-11.2	-8.6	-11.3	1.2	0.1
5	-2.6	-8.8	-10.3	-7.7	-12.4	1.1	2.1
2.5	-2.8	-7.6	-9.6	-7.9	-11.4	0.3	1.8
0	-3	-7.9	-9.1	-8.4	-11.8	0.5	2.7
-2.5	-3.2	-7.2	-8.6	-8.6	-10.4	1.4	1.8
-5	-3.4	-6.5	-7.9	-7.4	-9.8	0.9	1.9
-7.5	-3.6	-7.4	-7.4	-8.5	-10.8	1.1	3.4
-10	-3.8	-8.3	-7.8	-7.9	-10.6	0.4	2.8

采用标准偏差来衡量光束后向散射法与靶板测量法的检测误差值,其在方位、俯仰方向的误差值和总误差值的关系为:

$$\sigma_{\text{方位}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_{Ai}^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{俯仰}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_{Ei}^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{总}} = \sqrt{\sigma_{\text{方位}}^2 + \sigma_{\text{俯仰}}^2}, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

根据公式(4)~(6)可得两种方法检测误差值为  $\sigma_{\text{方位}}=1"$ ,  $\sigma_{\text{俯仰}}=2.3"$ ,  $\sigma_{\text{总}}=2.5"$ ,说明光束后向散射法切实可行,能够有效提高激光发射的指向精度。

## 3 结 论

为了验证光尖测量方法的准确性,利用远距离靶板测量方法进行对比试验,可以看出激光束后向散射

法与靶板测量法得到数据相差不大,测量总误差为2.5”,俯仰方向两者测得差值较大,主要原因是光尖距离估算误差和光尖消失点位置提取误差所致。

由以上试验数据可见,利用后向散射光尖测量误差修正方法,可以大大提高激光发射的指向精度,是一种可实际应用的对发射激光指向进行较精确修正的方法。

#### 参考文献:

- [1] Xue Xiangyao, Gao Yunguo. Analysis of optical axis parallelism error for the level mounting laser transmitter system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 335–336. (in Chinese)
- [2] Xue Xiangyao, Gao Yunguo. Correction of the laser pointing error of the level mounting laser transmitter system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 536–537. (in Chinese)
- [3] Ding Zhenyong, Ye Lu. Detection method of parallelism of optic axes between laser and visible optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 890–891. (in Chinese)
- [4] Qiao Jian, Gao Yunguo. Fast alignment of Coude optical system in alt-alt two axis tracking turntable [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1761–1762. (in Chinese)
- [5] Wang Mingjun, Wu Zhengsen. Computation and analysis on the laser scattering echo energy from whole dimension target under complex environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 68–69. (in Chinese)
- [6] Song Xueping, Jia Xiaodong. Experiment research on laser backscattering characteristic of fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 261–265. (in Chinese)
- [7] Zhang Haizhuang, Sun Yannan. 1.06 μm laser atmosphere to the back scattering intensity [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10 (4): 21–23. (in Chinese)
- [8] Zhang Haizhuang, Sun Yannan. 1.06 μm laser atmosphere to the back scattering intensity [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10 (4): 21–23.

(上接第 1977 页)

- [15] P G J Barten. Formula for the contrast sensitivity of the human eye[C]//SPIE, 2004, 5294: 231–238.
- [16] R Alter Gartenberg. Information metric as a design tool for optoelectronic imaging system [J]. *Applied Optics*, 2000, 39 (11): 1743–1760.
- [17] Chi Xuefen. Sampling imaging based on the theory of the information system evaluation and system technology research [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [18] Wang Jihui, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. General performance evaluation on thermal imaging systems with the square integral method based on MRTD channel width[C]//SPIE, 2007, 6835: 68350.
- [19] Cui Jianping, Wang Jihui, Jin Weiqi, et al. Research on the sampling performance of the focal plane array thermal

Chinese)

丁振勇,叶露. 激光与可见光系统光轴平行性检测 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 890–891.

- [4] Qiao Jian, Gao Yunguo. Fast alignment of Coude optical system in alt-alt two axis tracking turntable [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1761–1762. (in Chinese)
- [5] Wang Mingjun, Wu Zhengsen. Computation and analysis on the laser scattering echo energy from whole dimension target under complex environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 68–69. (in Chinese)
- [6] Song Xueping, Jia Xiaodong. Experiment research on laser backscattering characteristic of fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 261–265. (in Chinese)
- [7] Zhang Haizhuang, Sun Yannan. 1.06 μm laser atmosphere to the back scattering intensity [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10 (4): 21–23. (in Chinese)
- [8] Zhang Haizhuang, Sun Yannan. 1.06 μm laser atmosphere to the back scattering intensity [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10 (4): 21–23.

imaging systems [C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Advances in Infrared and Applications, 2011: 8193.

- [20] Zhou Yan. Photoelectric imaging system performance evaluation based on the human eye vision [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2002. (in Chinese)
- [21] Huan Kewei, Pang Bo, Shi Xiaoguang, et al. Study on the method of infrared imaging system performance test and evaluation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (5): 482–486. (in Chinese)
- [22] Wang Jun, Gao Jiaobo, Hu Yu. Uav infrared radiation characteristic test and range estimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 504–509. (in Chinese)
- [23] Zhang Gongpo. Infrared imaging system of testing and evaluation [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)