

文章编号: 1001-3806(2010)01-0132-03

## 凝视激光探测系统的探测灵敏度测试方法

杨晓杰, 周冰, 应家驹, 周中亮  
(机械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 为了研究凝视激光探测系统的探测灵敏度指标性能, 针对凝视激光探测系统的凝视成像特性及探测面元接收激光能量会随视场角的变化而改变的特点, 从实验室现有测试条件出发, 设计了一套关于其探测灵敏度的室内间接测试方法。分析了测试过程中各环节应注意的问题, 给出了相应解决方法, 对搭建的模拟激光探测系统在不同的方位角下进行了激光发射、探测实验测试, 得出7个不同方位角的探测灵敏度结果, 其中, 中心视场角探测灵敏度为 $0.259\text{ nJ}/\text{cm}^2$ , 相对误差在 $3.4\% \sim 4.2\%$ 范围内, 得出该系统最小可探测能量随视场角增大而增大的规律, 并定性分析了测试误差。结果表明, 该设计方法实际可行, 误差精度可以达到规程要求, 为进一步研究设计高精度的灵敏度测试系统提供了有益参考。

**关键词:** 测量与计量; 探测灵敏度; 激光探测; 测试方法

中图分类号: TN247 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.037

### Test method of detection sensitivity of starring laser detecting systems

YANG Xiao-jie, ZHOU Bing, YING Jia-ju, ZHOU Zhong-liang

(Department of Optics and Electron Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to study the detection sensitivity of a starring laser detecting system, considering the features of the starring laser detecting system and the fact that the detected laser energy varying with different view field angle, based on the available measure condition in laboratory, an indirect method was presented to test the detection sensitivity in laboratory. Probable problems in each part of the design were analyzed, and their resolution methods were put forward accordingly. Based on the experimental setup, experiments were carried out and the detection sensitivity was obtained at seven view angles. the detection sensitivity in center view field reaches  $0.259\text{ nJ}/\text{cm}^2$  with a relative deviation of  $3.4\% \sim 4.2\%$ . The measurement error was also theoretically analyzed. The test results confirm that the method is feasible and practical, and the accuracy meets the requirement. This method is useful for the design of high precision test systems.

**Key words:** measurement and metrology; detection sensitivity; laser detection; testing method

### 引言

激光探测技术是光电对抗技术的重要组成部分。在众多探测方式中, 利用广角远心鱼眼透镜<sup>[1]</sup>和 CCD 摄像器件组成的凝视激光探测系统, 由于具有大空域凝视、响应速度快、定位精度高<sup>[2,3]</sup>等优点而倍受使用方青睐。在研究凝视激光探测技术及研制探测系统的同时, 如何测评凝视激光探测系统的灵敏度、方向分辨率、告警概率、反应时间等性能, 也成为备受关注的课题。其中, 灵敏度是体现系统探测能力的主要指标<sup>[4]</sup>, 如何对其进行测试已成为一项重要研究内容。目前, 测试主要有单光路直接比较法和双光路对比替代法<sup>[5,6]</sup>两种, 前者方法简单, 但要求激光器输出功率

稳定性好; 后者可消除激光不稳定造成的影响<sup>[7]</sup>, 但要求配置标准探测器, 且布设困难; GJB5099-2004 中采用的是单光路法, 但对于具体特性系统(如凝视探测系统)的适用性还有一定局限。考虑到当前技术比较容易实现激光器稳定输出, 本文中针对凝视激光探测系统大视场角等特点, 依据实验室现有测试条件, 在单光路法的基础上, 设计了一套灵敏度间接测试系统。

### 1 灵敏度测试原理

激光探测系统探测灵敏度是指满足系统探测概率要求的最小可探测能量密度(或激光功率), 它是激光探测系统静态参量中的一项重要指标。其测试基本原理为: 衰减后的激光射至被测系统, 改变衰减量直到满足系统探测概率时, 测得其可探测接收的最小能量密

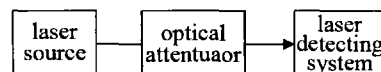


Fig. 1 Diagram of detection sensitivity testing

作者简介: 杨晓杰(1981-), 男, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事光电对抗技术的研究。

E-mail: yangxiaojie2004@sina.com

收稿日期: 2008-11-20; 收到修改稿日期: 2009-03-02

度(或激光功率),即得探测灵敏度,如图 1 所示。

激光探测系统最小可探测能量一般要求在纳焦耳量级。通常在室内测试时,由于受能量计量程限制,一些能量值不宜直接测得,此外,基于凝视成像特性<sup>[8]</sup>,探测面元接收的激光能量将会随视场角的变化而改变,正入射角下所测数值不能反映整个系统的实际性能。根据上述特点,采取间接法进行测试,并利用测角机构,取不同激光入射角进行全面测试。激光器出射的激光,经过衰减器件(固定衰减片和连续可调衰减器),再经准直扩束系统<sup>[9]</sup>射向被测激光探测系统(该系统置于测角机构上),如图 2 所示。

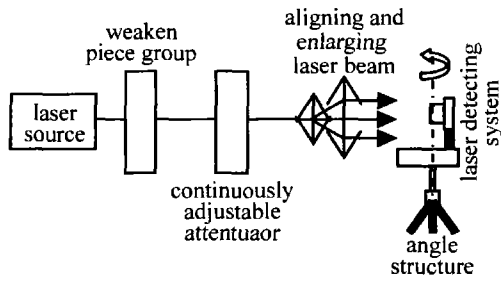


Fig. 2 Detection sensitivity tested indirectly

具体测试步骤如下:

(1)在测试光路中未放置衰减器件的情况下,能量探头捕获到准直扩束激光能量  $E_0$ ,多次测量求平均值  $\bar{E}_0$ ,得到平均能量密度:

$$\rho_0 = \bar{E}_0/S \quad (1)$$

式中, $S$ 为激光能量探头面积。

(2)置入衰减系统(衰减片组和可调衰减器),估计并设置适当的衰减量,发射激光重复测量,并记录被测系统的探测情况,求取探测概率<sup>[10]</sup>:

$$P_d = (M/N) \times 100\% \quad (2)$$

式中, $P_d$ 为探测概率; $M$ 为正常有效探测次数; $N$ 为有效激光发射次数。改变衰减量,重复上述步骤,直到探测概率达到规定指标为止。

(3)在测试光路中,分别测试标定各衰减器件(固定衰减片和可调衰减器)的实际透过率:

$$\tau_n = \bar{E}_n/\bar{E}_0 \quad (3)$$

式中, $\tau_n$ 为第  $n$  个衰减器件的透过率; $\bar{E}_0$ 为能量探头捕获的未经衰减的激光平均能量; $\bar{E}_n$ 为单独放置第  $n$  个衰减器件(固定衰减片和可调衰减器)后能量探头捕获的激光平均能量。

(4)由(1)式、(3)式求取最小可探测能量密度,即探测灵敏度:

$$\rho = \rho_0 \times \tau = (\bar{E}_0/S) \times (\tau_1 \times \tau_2 \times \dots \times \tau_n) = (\bar{E}_0/S) \times \left( \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_0} \times \frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_0} \times \dots \times \frac{\bar{E}_n}{\bar{E}_0} \right) \quad (4)$$

式中, $\rho$ 为系统探测灵敏度, $\tau$ 为衰减系统总透过率。

(5)改变激光入射角,重复上述步骤,分别测得不同入射角下的探测灵敏度。

由述可以知道,只要测得激光能量探头(探测面积已知)捕获的能量以及衰减系统的实际透过率,即可得到被测系统的最小可探测能量密度,即探测灵敏度。该测试需注意的事项:(1)应选择稳定性好的激光器充当光源;(2)设置衰减量要遵循由大及小的原则,以免强光束损伤被测系统;衰减片须严格垂直于光轴,否则会使出射光线产生微小偏移;(3)准直扩束光束横截面须大于能量探头面积,保证完全覆盖能量探头;(4)精确调校测角机构 3 轴垂直关系,保证旋转轴线严格垂直于测试平台;微调被测系统使其物镜主点位于旋转轴线与系统光轴的交点处,保证旋转时物镜主点始终处于光轴上;(5)红外光路的准直调校,可用可见光激光源配合折反镜等通过自准直法来调试光路。

## 2 实验测试及误差分析

由鱼镜头、CMOS 阵列探测器、图像采集卡及计算机模拟搭建激光探测系统。采用某型脉冲激光测距机(波长  $1.06\mu\text{m}$ )充当激光光源;使用该测距机测角机构(测角范围:方向角  $60-00$ ,测角精度: $0-01$ ,此处用密位表述)为测角平台;衰减片 1 为 GCC-301071(透过率标称值为  $0.1\%$ ),衰减片 2 为 GCC-301041(透过率标称值为  $10\%$ ),衰减器 3 为可调衰减器 M-935-3-OPT(变化范围  $50\text{dB}$ );采用 EMP-1000 型(Coherent Ltd.)能量计及能量探头 J25LP-MB(量程: $200\mu\text{J} \sim 1000\text{mJ}$ )和 J25LP-1A(量程为  $1\mu\text{J} \sim 4\text{mJ}$ )为计量仪器。在半视场  $60^\circ$  范围内,从  $0^\circ$  开始,以  $10^\circ$  为步进值,在不同入射方位角下,对搭建的激光探测模拟系统进行测试。每一方位角均进行 100 次测试,满足探测概率的指标下,对各测试量重复测 10 次,测试数据见表 1、表 2。

Table 1 Testing data of  $E_0, E_1, E_2$

sequence	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_0/\text{mJ}$	7.63	7.45	7.59	7.56	7.49	7.61	7.38	7.23	7.46	7.54
$E_1/\mu\text{J}$	34.47	35.24	34.39	34.26	34.89	34.39	34.56	34.61	34.30	34.41
$E_2/\mu\text{J}$	841.58	841.44	841.39	841.96	842.01	841.89	841.56	841.61	841.30	841.71

Table 2 Testing data of  $E_3/\mu\text{J}$ 

sequence	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
1	3.136	3.142	4.569	9.942	13.26	17.07	21.82
2	3.148	3.135	4.481	9.871	13.63	17.54	22.19
3	3.314	3.141	4.530	9.869	13.56	17.47	21.95
4	3.044	3.314	4.572	9.917	13.78	16.80	21.89
5	3.142	3.142	4.550	9.879	13.23	17.25	22.05
6	3.135	3.154	4.579	9.888	13.41	17.36	21.66
7	3.041	3.148	4.494	9.930	13.82	16.94	21.83
8	3.142	3.150	4.532	9.915	13.76	16.79	21.79
9	3.141	3.044	4.567	9.892	13.49	17.41	22.39
10	3.154	3.041	4.590	9.885	13.75	17.32	22.25

分别求取  $E_0, E_1, E_2, E_3$  的算术平均值、标准偏差, 计算公式如下:

$$\bar{E}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{n,i} \quad (5)$$

$$s_{E_n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{n,i} - \bar{E}_n)^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中,  $n$  分别取 0, 1, 2, 3, 数据处理结果见表 3、表 4。

Table 3 Average value and standard deviation of  $E_0, E_1, E_2$ 

item	$E_0/\text{mJ}$	$E_1/\mu\text{J}$	$E_2/\mu\text{J}$
average value	7.49	34.55	841.64
standard deviation	0.12	0.30	0.24

Table 4 Average value and standard deviation of  $E_3$ 

angle	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
$\bar{E}_3/\mu\text{J}$	3.139	3.141	4.546	9.898	13.57	17.26	21.98
$s_{E_3}/\mu\text{J}$	0.074	0.074	0.037	0.025	0.22	0.25	0.23

已知探头面积  $6.25\text{cm}^2$ , 将上述各算术平均值相应代入(4)式, 计算最小可探测能量密度平均值(探测灵敏度)  $\bar{\rho}$ , 测量误差  $s_{\bar{\rho}}$  采用“ISO1993(E)指南”所规定的测量合成(标准)不确定度<sup>[11]</sup>表征, 计算公式如下:

$$s_{\bar{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial E_0}\right)^2 s_{E_0}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial E_1}\right)^2 s_{E_1}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial E_2}\right)^2 s_{E_2}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial E_3}\right)^2 s_{E_3}^2} \quad (7)$$

数据处理结果如表 5 所示。

Table 5 The test result of starring laser detecting system/( $\text{nJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ )

angle	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
$\bar{\rho}$	0.259	0.259	0.376	0.818	1.121	1.427	1.817
$s_{\bar{\rho}}$	0.011	0.011	0.013	0.028	0.042	0.052	0.064

上述结果表明, 中心视场探测灵敏度达到  $0.259\text{nJ}/\text{cm}^2$ , 并且最小可探测能量密度随着视场角增大而增大, 计算相对误差 ( $s_{\bar{\rho}}/\bar{\rho}$ ) 在 3.4% ~ 4.2% 范围内, 达到规程要求。

误差一方面来自激光能量和衰减器件透过率的测试, 一方面来自计算累计的误差, 其中, 能量测试误差是主要来源。本实验中未采取隔热、防震措施, 受外界环境的影响, 如环境温度对激光器的稳定性以及对激光能量探头的内部噪声<sup>[12]</sup>均会产生一定影响, 对能量测试影响较大。选取稳定性好的激光器, 采取有效防震措施, 设置良好的恒温条件, 减小热源热量传递, 可进一步提高测试精度。此外, 在设计测试方法时, 应遵循简化测试环节、减少运算次数的原则, 进一步减小传递误差。

### 3 小结

设计了室内条件下关于凝视式激光探测系统探测灵敏度的间接测试方法, 实验测试表明, 该方案可行、简单且误差精度达到了规程要求。当然, 该方法由于受测试环境扰动、测试计量仪器精度等影响, 还有待进一步的优化验证, 此外, 测试复杂环境下的激光探测系统的探测灵敏度, 还有待于进一步的研究, 如建立背景噪声模型、大气衰减模型、误差模型, 以及相应硬件模拟设备的研制等。

### 参 考 文 献

- [1] WANG Y Zh. Fish eye lens optics [M]. Beijing: Science Press, 2006: 12-16 (in Chinese).
- [2] WANG Y Zh. Modern military optics technology [M]. Beijing: Science Press, 2003: 387-389 (in Chinese).
- [3] WANG Y Zh, ZHOU B, HE Y Q, et al. Laser spot location in imaging laser detecting systems [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 248-251 (in Chinese).
- [4] GONG F A, ZHOU Y F, ZANG Sh H, et al. The outdoor test method of laser warning equipment [C]//The 12th Academic Annual Meeting Collection in Electronic Countermeasure Branch of Chinese Electronic Society. Beijing: Chinese Electronic Society, 2001: 717-718 (in Chinese).
- [5] State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T13584-92 Parameter measurement for infrared detector [S]. Beijing: Standards Press of China, 1992 (in Chinese).
- [6] LIU H, ZHU R H, ZHU Y, et al. Semiconductor photo detector spectro-photoelectrical sensitivity test [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1999, 23(2): 129-131 (in Chinese).
- [7] WU Q B. Research on parameters-automatic-measurement system of the quarter infrared optic-electronic detector [D]. Wuhan: Science & Technology of Huazhong University, 2005: 9-10 (in Chinese).
- [8] CHENG Y B, LI Q, LIU Sh Q. A novel design for laser orientation detection system [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 538-540 (in Chinese).
- [9] SU D T. Optics testing technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 104-106 (in Chinese).
- [10] SHI Ch W, SUI Q Q, SHI B Y. A new automatic test system of reaction time and detection [J]. Electro-optic Technology Application, 2008, 23(1): 38-40 (in Chinese).
- [11] FAN Zh G. Photoelectric testing technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2004: 4-7 (in Chinese).
- [12] MIU J D, XU W J, MOU T Sh. Photoelectric technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1995: 54-56 (in Chinese).