

# 一种投影式激光方向测量方法

刘智超 张记龙 阎 鹤 王志斌 李 晓 田二明

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

**摘要** 为了在激光告警中实现全方位角度探测,且达到一定的探测精度,提出了一种投影式激光方向测量方法。通过计算激光照射在参量给定的遮光板上形成的投影量,求解在探测器上由不同探测象限产生的不同的探测电流的比值,再根据投影面积的比值与角度一一对应的关系可事先编码的原理,由对应程序判断激光入射方向。在软件 Matlab 仿真中计算得到产生最小分辨率的四个极限角度分别为 $(0^\circ, 90^\circ)$ 、 $(33^\circ, 21^\circ)$ 、 $(33^\circ, 69^\circ)$ 、 $(45^\circ, 90^\circ)$ ,并由实验得到最小分辨电压为 0.05 V。通过仿真计算与实验数据证明该设计可达到最小识别角度  $1^\circ$  的探测要求。

**关键词** 激光告警; 激光方向测量; 位置敏感探测器(PSD); 角度识别

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082808.1518

## A Method of Projection Measurement for Laser Direction

Liu Zhichao Zhang Jilong Yan He Wang Zhibin Li Xiao Tian Erming

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, Photoelectric Information and Equipment Engineering Research Centers, North University of China, Taiyuan, Shanxi, 030051, China)

**Abstract** In order to achieve all-round angle detection in laser warning with a certain accuracy, we proposed a method of measuring laser direction using geometrical projection. By calculating the shading area when laser projects on the board with given parameters, we got the current ratio from the different quadrants of the measurement, and the direction of the incident laser can be judged by the corresponding relation between projection area ratio and angle using the program for angle detection. For a minimum resolution of angle detection, the limit angles are calculated as  $(0^\circ, 90^\circ)$ ,  $(33^\circ, 21^\circ)$ ,  $(33^\circ, 69^\circ)$ ,  $(45^\circ, 90^\circ)$  in Matlab, and the minimum voltage 0.05 V in experiment. The simulation calculation and the experimental data show that the design can achieve the detection requirements of the minimum identification of  $1^\circ$ .

**Key words** laser warning; laser direction measurement; position sensitive detector (PSD); perspective recognition

## 1 引 言

激光侦察、激光测距和激光制导武器等在军事上的成功应用促使世界上各军事强国都加速研制和应用激光预警接收系统<sup>[1,2]</sup>。大功率可调谐激光器在军事上的应用将使现有的正在服役的各种激光预警接收器几乎失效<sup>[3-5]</sup>。为能有效预防遭受激光制导武器等的精确打击,急需研制新型激光预警接收器系统。光电侦察与告警技术是光电对抗的重要组成部分,来袭激光方向的测量作为激光告警的重要

组成部分已被广泛的研究。目前激光方向测量方法<sup>[6]</sup>通常可分三种:成像型、掩模编码型和多窗口探测型。成像型方法使用多源面阵探测器,反应速度慢,且测量精度受到探测器非均匀性制约<sup>[7]</sup>;掩模编码型方法易受大气闪烁影响,且探测阵列的长度必须小于受大气影响的菲涅耳尺度<sup>[8]</sup>;多窗口探测型方法的光学窗口和探测器较多,仪器体积大,信号处理复杂,设备维护比较困难<sup>[9]</sup>。

本文提出的投影式激光方向测量方法,具有快速、稳定、结构简单等优点。为了提高探测速度,采

收稿日期: 2007-11-16; 收到修改稿日期: 2008-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(60572019)、高校博士基金(20070110004)和山西青年科技基金(2007021019)资助课题。

作者简介: 刘智超(1984—),男,硕士研究生,主要从事光谱分析、信息处理等方面的研究。E-mail: s20070384@163.com

导师简介: 张记龙(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光、光谱探测技术、光电信息处理等方面的研究。

用位置敏感探测器(PSD)取代 CCD,增加遮光板以提高探测稳定性及精确度,同时在工艺上四象限分割比多窗口型要更简单、稳定。

## 2 方案设计

### 2.1 基本原理

当光照射在几何外型一定的物体上时,在已知该物体的参量情况下,入射光产生的投影是可以计算的。对于任意角度的入射光与其投影都是一一对应的,所以可以精确地描述投影面积,精确地判断出激光的入射方向。对每种由于投影面积不同而产生的不同探测电流信号进行数字化并存储,通过它们之间的比值进行编码并编译出判断程序。

### 2.2 结构设计

在面阵探测器<sup>[10]</sup>探测面的几何中心上添加参量已定的遮光板,通过激光不同角度入射时产生的不同阴影面积,从而产生不同的探测电流,再由这个入射角度与电流组成的一一对应的函数判断激光的入射方向。如图 1,探测器的外型为在面阵上连接四个不透光的遮光板(几何外型完全相同),遮光板的宽度为  $d$ ,高度为  $h$ 。探测表面被分为四个区域,分别是象限 1~4,每个探测象限分别输出一个由入射光产生的探测电流。

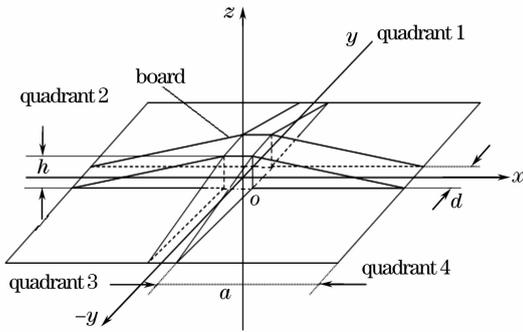


图 1 探测面及遮光板立体图

Fig. 1 Three-dimensional detection plane and shadow shield

### 2.3 激光入射方向与探测电流的函数关系

因为探测到的电流与入射光功率成正比,为了更直观地表现光照射探测器时与角度的对应关系,用功率代替电流(功率即光照度,在波长一定时的光通量照射在探测器上时的光照度<sup>[11]</sup>)。将激光入射方向分解到  $xoy$  平面和  $opq$  平面,由方位角  $\alpha$  和俯仰角  $\beta$  确定。假设激光垂直照射功率为  $P_0$ ,四个象限接收的功率分别是  $P_1, P_2, P_3, P_4$ ,激光方向分解为与  $x$  轴负半轴夹角  $\alpha$  和与  $xoy$  面夹角  $\beta$ 。当任意角度入射时,可得

$$y = (a \tan \alpha - d) + d = a \tan \alpha, \quad (1)$$

因此投影面积与  $d$  无关,因为求阴影时只用到与激光相对的垂面。通过对所有入射激光方向进行求解,将其对应的功率函数全部求出。当方位角  $\alpha = 0$ ,俯仰角  $\beta \in (0, \varphi)$  时,功率表达式为

$$P_1 = P_2 = \frac{aP_0}{2h} \left( \frac{1}{\cos \beta} - \cos \beta \right), \quad (2)$$

$$P_3 = P_4 = P_0 \sin \beta.$$

通过对四个探测象限上产生功率的求解,可见,其函数的唯一性,从而得出该方法是可行的。对角度所对应的各个功率比进行编码,就可以由功率比(可以换算成探测电压比)的计算唯一地确定激光的入射方向。由阴影构成的各个探测象限接收的功率不同,其功率差较大、信噪比高、判断信号容易、误码率低。要特别说明的是,所求的所有象限的功率值在应用比值编码求解过程中并不需要将其全部求出,而只要用其中两个量即可,这个选择过程应该在判断程序中实现(将四个象限的探测值定义为四个变量,通过对变量大小的判断选择相对应的函数)。

### 2.4 探测器的选择

用于对光目标实行定位的二维位敏光电探测器主要有:CCD 面阵探测器,互补性氧化金属半导体(CMOS)面阵探测器,四象限光电探测器,位置敏感探测器(PSD)。从成本、工作原理、灵敏度等方面综合考虑,本设计选择位置敏感探测器。

## 3 最小识别角度的可行性研究

### 3.1 论证依据

判断探测器灵敏度是否能够满足识别角度要求的方法是:在任意两个入射角度产生的不同投影面积之差所引起的探测器的探测量大于探测器的灵敏度。在设计中激光入射的任意角度可以表示为  $(\alpha, \beta)$ ,则当要求角度分辨率为  $\Delta\theta$  时,可以看作任意的  $(\alpha, \beta)$  到  $(\alpha + \Delta\theta, \beta + \Delta\theta)$  所产生的探测电流大于探测器的最小识别电流。而由  $(\alpha, \beta)$  到  $(\alpha + \Delta\theta, \beta + \Delta\theta)$  所产生的电流可以由不同的投影面积之差求出,将所有方向中产生面积差的最小值找出,并通过探测器的灵敏度来判断其是否满足要求。

### 3.2 最小面积差函数与最小识别角度的函数关系

假设  $a, d, h$  已知,由给定的参量可以求得任意两个方向(夹角为  $\Delta\theta$ )在探测器上产生的投影面积差的函数:

$$\begin{aligned} \Delta S_1 &= \frac{a^3}{2h} [\tan(\beta + \Delta\theta) - \tan \beta], \\ \Delta S_2 &= \frac{ah}{2} \left[ \frac{\tan(\beta + \Delta\theta) - \tan \beta}{\tan(\beta + \Delta\theta)\tan \beta} \right], \\ \Delta S_3 &= h \left| \frac{\cos \alpha (a \tan \beta + h \cos \alpha) - \sin \alpha (a \tan \beta + h \sin \alpha)}{(a \tan \beta + h \sin \alpha)(a \tan \beta + h \cos \alpha)} \right|, \\ \Delta S_4 &= \frac{a^2 h}{2} \left| \frac{\sqrt{2}(a + d) [\tan(\beta + \Delta\theta) - \tan \beta]}{[\sqrt{2}(a + d)\tan \beta + h][\sqrt{2}(a + d)\tan(\beta + \Delta\theta) + h]} \right|, \\ \Delta S_{\min} &= \min[\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3, \Delta S_4], \end{aligned} \tag{3}$$

式中  $\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3, \Delta S_4$  分别为在四种情况下照射, 随照射角度变化的面积差;  $\Delta S_{\min}$  为最小的面积差;  $a$  为一个象限的宽度;  $h$  为遮光板高度;  $d$  为两象限间距;  $\theta$  为  $\alpha=0$  时的  $\beta, \Delta\theta$  为角度变化量。

由(3)式可见,  $\Delta\theta$  是投影面积差函数的一个变量, 同时它也是探测器能够分辨的最小角度。投影面积差函数与  $\Delta\theta$  的函数关系就是当  $\Delta\theta$  在一定的范围内变化时投影面积差函数的变化, 也就是最小分辨角度与探测器灵敏度的动态函数关系。

## 4 仿真实验

### 4.1 投影面积差与 $\Delta\theta$ 动态关系

$\Delta\theta$  作为最小识别角度将其定为  $1^\circ$ , 然后通过对面积差函数的求解仿真得到函数图像。

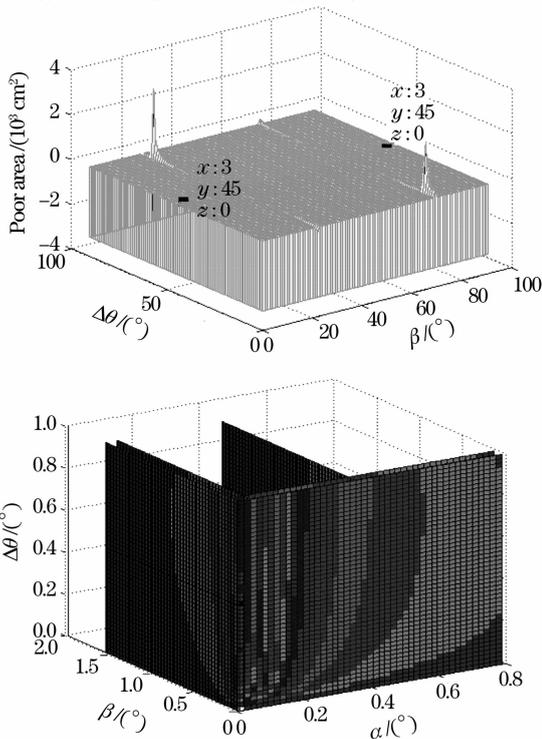


图 2(a)为当激光以  $\alpha=0, \beta < \phi [\phi = \arctan(h/a)]$  时入射, 角度每改变  $1^\circ$  时产生的面积差, 图中标出的点为其最小值; 图 2(b)为当激光以  $\alpha=0, \beta > \phi$  时入射, 角度每改变  $1^\circ$  时产生的面积差, 图中标出的点为其最小值; 图 2(c)为当激光以  $0 < \alpha < 45^\circ$  时入射, 角度每改变  $1^\circ$  时关于  $\alpha, \beta$  的面积差, 当最小分辨角度在  $0^\circ \sim 1^\circ$  范围内变动时面积差函数的变化过程, 说明在理论上当最小识别角度为  $0.5^\circ$  时, 用面积差函数无法实现判断, 所以只要  $\Delta\theta > 0.5^\circ$  时, 面积差函数就可以判断方向信息。图 2(d)当激光以  $\alpha=45^\circ$  时入射, 角度每改变  $1^\circ$  时产生的面积差。

### 4.2 最小识别角度为 $1^\circ$ 时的仿真结果

当最小识别角度采用  $1^\circ$  时, 满足探测器的灵敏度要求可以由图像直接判断  $\Delta S_{\min}$  得出。假设  $a =$

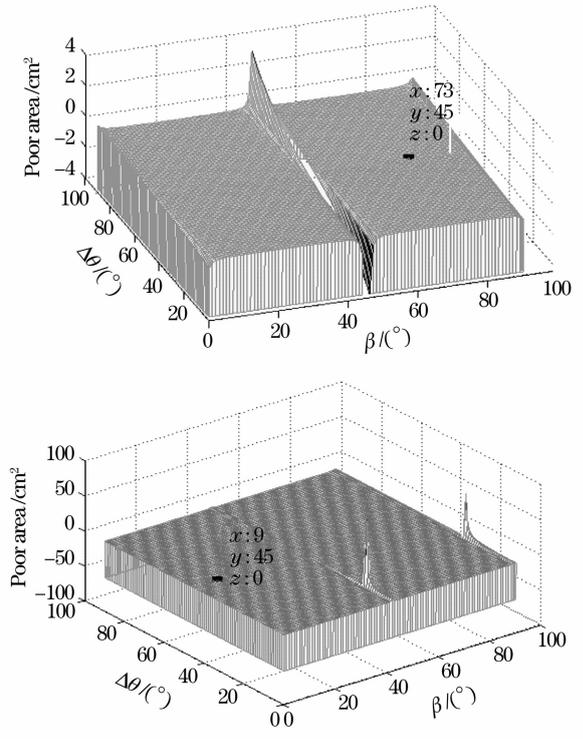


图 2 投影面积差与最小识别角度  $\Delta\theta$  的关系图

Fig. 2 Relationship of projection area difference and the minimum discriminated angle  $\Delta\theta$

1 cm,  $d=0.5$  cm,  $h=1$  cm, 仿真结果如图 3 所示。

通过对任意两个相邻角度在探测器上形成的不同投影面积差函数的仿真,可以直观地得到其中最小的面积差的大小,及取最小面积差的对应角度。图 3(a)~图 3(d)中面积差函数最小值分别  $1.764 \times 10^{-2}$   $\text{cm}^2$ ,  $4.364 \times 10^{-3}$   $\text{cm}^2$ ,  $3.01 \times 10^{-4}$   $\text{cm}^2$ ,  $3.951 \times$

$10^{-4}$   $\text{cm}^2$ 。由此可知,  $\Delta S_{\min} = 3.01 \times 10^{-4}$   $\text{cm}^2$ , 即最小长度识别单位要求为 0.17 mm, 即数量级为  $10^{-4}$  (100  $\mu\text{m}$ )。而普通的二维 PSD 的分辨率为  $1 \sim 5$   $\mu\text{m}$ , 灵敏度符合要求, 所以用二维 PSD 可以实现本设计的精度要求。

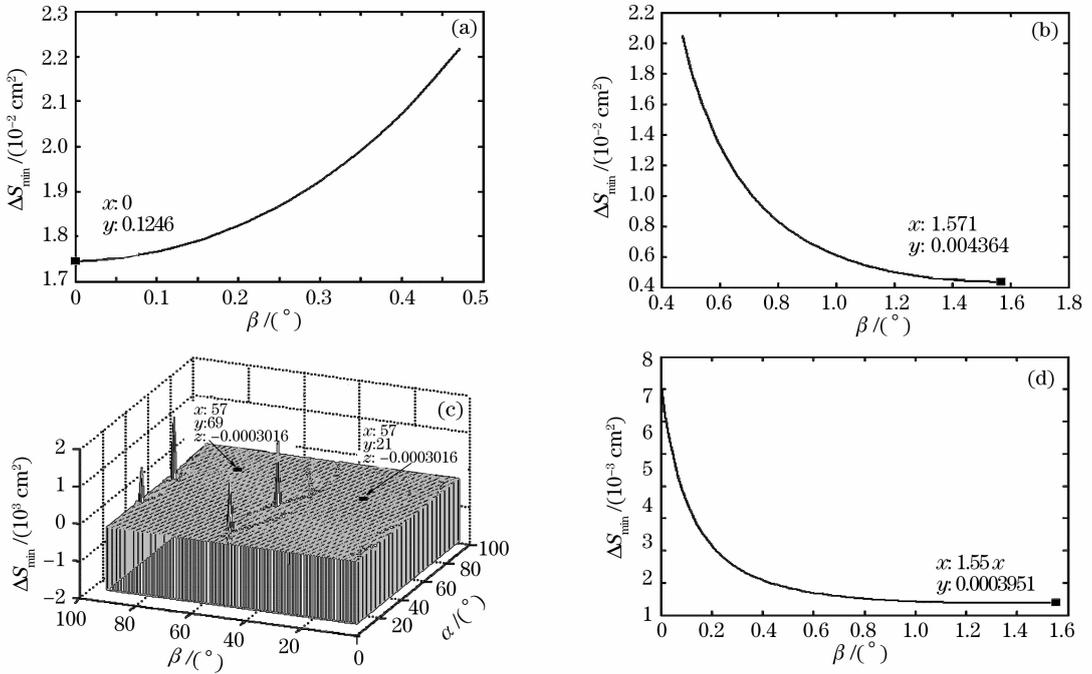


图 3 投影面积差函数仿真图

Fig. 3 Simulation of the projection area difference function

由计算仿真结果可知,在四个极限角度位置,激光在 PSD 上的投影变化最小,产生的探测电流最小,所以以这四种情况为例分别做实验,如果满足探测要求则证明在全方位角上都是成立的。计算可得四个极限角度分别是:  $(0^\circ, 90^\circ)$ 、 $(33^\circ, 21^\circ)$ 、 $(33^\circ, 69^\circ)$ 、 $(45^\circ, 90^\circ)$ 。

## 5 实 验

在室内存在自然背景光的条件下,采用两块 W103 型 PSD 垂直放置,PSD 有效长度定为 4 cm ( $a=2$  cm),遮光板高为  $h=1$  cm,再由 WG100 信号处理器将 PSD1,2 探测到得电流  $I_1, I_2$  转化为相应的电压  $V_1, V_2$ ,实验测量装置如图 4 所示。

随激光光源的角度变化,PSD 输出端电压也随之变化。在最小识别角度选定为  $1^\circ$  时,一共有 64800 ( $360 \times 180$ ) 种情况,由于推导证明了在 PSD 上的投影变化最不明显的四种情况,即四个极限角度。激光从四个极限位置入射,再分别测量与极限位置相邻的四个角度的电压值,实验结果如表 1 所

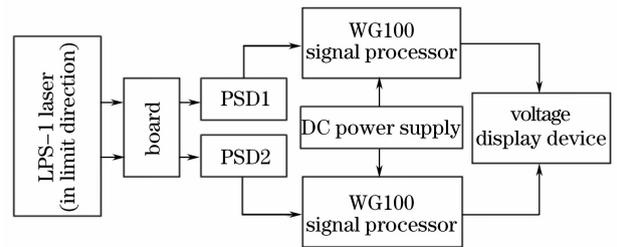


图 4 测量系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement system

示;激光由相对零点向两侧分别移动,观察 PSD 的探测精度及线性度,实验结果如表 2 所示。

表 1 中数据表示在达到最小识别面积的 4 种情况下电压随角度变化的实验值。从  $V_1, V_2$  中任意两组相邻角度的实验数据中可以看出,四组实验数据中最小电压变化分别为 0.40 V、0.06 V、0.05 V、0.06 V,其中最小电压变化值为 0.05 V,说明在全方位角中激光照射在任意两个相邻角度间产生的最小电压变化值为 0.05 V (在极限角度 1 处  $\alpha \leq 0$  时,完全无光照射,所以电压  $V_2$  全为 0)。

表 1 激光在四种极限角度照射 PSD 的实验数据  
Table 1 Experimental data of voltage when PSD  
is illuminated by laser at four limit angles

	$(\alpha, \beta)$	Voltage $V_1/V$	Voltage $V_2/V$
1	$0^\circ, 89^\circ$	-0.40	0.00
	$0^\circ, 90^\circ$	0.00	0.00
	$0^\circ, -1^\circ$	0.41	0.00
	$-1^\circ, 90^\circ$	0.00	0.00
	$1^\circ, 90^\circ$	-0.40	-0.05
2	$33^\circ, 20^\circ$	-2.57	-2.43
	$33^\circ, 21^\circ$	-2.50	-2.51
	$33^\circ, 22^\circ$	-2.43	-2.57
	$32^\circ, 21^\circ$	-2.44	-2.44
	$34^\circ, 21^\circ$	-2.58	-2.58
3	$33^\circ, 68^\circ$	-5.17	-5.16
	$33^\circ, 69^\circ$	-5.11	-5.10
	$33^\circ, 70^\circ$	-5.06	-5.06
	$32^\circ, 69^\circ$	-5.05	-5.05
	$34^\circ, 69^\circ$	-5.15	-5.15
4	$45^\circ, 89^\circ$	-3.50	3.37
	$45^\circ, 90^\circ$	-3.43	-3.44
	$45^\circ, 91^\circ$	3.38	-3.49
	$44^\circ, 90^\circ$	-3.51	-3.39
	$46^\circ, 90^\circ$	-3.38	-3.50

表 2 中数据为当激光照射在 PSD 上时,每改变其相对中心坐标的距离而产生的两端输出电压的改变量,当投影在探测器上任意 0.1 mm 的改变量,引起的电压最小变化值为 0.06 V。在测量过程中不可避免地会引入操作误差、仪器误差等,但多组数据中最小电压改变量的期望均超过 0.05 V,在允许 0.01 V 的测量误差的情况下是不影响后续处理的。

表 2 PSD 位移变化实验数据

Table 2 Experimental data of position change on PSD

Position /mm	Voltage $V_1/V$	Voltage $V_2/V$
0.1	-0.01	-0.01
0.2	-0.07	-0.07
0.3	-0.13	-0.12
0.4	-0.19	-0.19
0.5	-0.26	-0.25
0.6	-0.31	-0.30
0.7	-0.36	-0.37
0.8	-0.42	-0.42
0.9	-0.47	-0.48
1.0	-0.52	-0.51

综上所述,实验结果表明,激光在上半平面入射角度任意改变  $1^\circ$  引起的电压最小改变量为 0.05 V,以 0.05 V 作为角度识别的最小电压满足最小角度  $1^\circ$  的探测要求。

## 6 结 论

利用激光入射角度与投影的关系,提出了投影式激光方向测量方法。对激光入射方向的所有情况进行分类分析,推导出在这些情况下的最小面积差方程,并通过软件 Matlab 仿真计算出产生最小面积差的四种极限角度分别是  $(0^\circ, 90^\circ)$ 、 $(33^\circ, 21^\circ)$ 、 $(33^\circ, 69^\circ)$ 、 $(45^\circ, 90^\circ)$ 。实验结果表明,在四种极限角度附近以  $1^\circ$  作为最小变化角度,PSD 探测器所能探测到的最小电压值为 0.05 V,说明在上半平面任意两个相邻  $1^\circ$  间产生的最小电压变化值为 0.05 V,将 0.05 V 作为角度识别的最小电压满足最小识别角度  $1^\circ$  的全视场激光方向探测的要求。

## 参 考 文 献

- Cheng Yubao, Li Qing, Liu Shangqian. Multi-window design for laser orientation measurement [J]. *Applied Optics*, 2005, **26**(6): 53~56  
程玉宝,李庆,刘上乾. 一种激光定向的多窗口设计[J]. *应用光学*, 2005, **26**(6): 53~56
- Li Shushan, Sun Chunsheng, Han Xiaobing. Angular resolution techniques of laser radiation [J]. *J. Naval University of Engineering*, 2003, **15**(2): 30~34  
李树山,孙春生,韩小兵. 激光辐射方位的确定技术[J]. *海军工程大学学报*, 2003, **15**(2): 30~34
- Zhang Jilong, Fu Lin, Wang Zhibin *et al.*. The measurement method of wavelength and direction of tunable laser single pulse under sun light [J]. *J. Test and Measurement Technology*, 2005, **19**(1): 2~4
- Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 253~258  
敖磊,谭久彬,崔继文等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 253~258
- Wu Saiyan. Analysis on properties of PSD and its application [J]. *Mechanical Engineering and Automation*, 2007, (2): 109~111  
吴赛燕. PSD 的性能分析及其应用[J]. *机械工程与自动化*, 2007, (2): 109~111
- Tang Jiuyao, Lin Jinjun, Sun Xiaobin. Preparation of a pin-cushion two-dimensional position sensitive detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 233~236  
唐九耀,林进军,孙晓斌. 枕型二维位置敏感探测器的研制[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 233~236
- Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Anti-noise and precise circle target center location method of CCD laser autocollimator [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1610~1613  
敖磊,谭久彬,崔继文等. 激光 CCD 自准直仪圆目标中心抗噪声精确定位方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1610~1613
- Yong Deng, Qiang Lu, Qing Mingluo. Determining particle size distribution and refractive index in a two-layer tissue phantom by linearly polarized light [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1): 45~48
- Li Sining, Wang Qi, Liu Jinbo *et al.*. Experimental research on resolution of streak tube imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1023~1026  
李思宁,王骐,刘金波等. 条纹管激光成像系统空间分辨力实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1023~1026
- Marcel Dobber, R. Dirksen, Pieter Levelt *et al.*. The on-ground calibration of the ozone monitoring instrument from a scientific point of view [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5244**: 400~410
- T. Shiroka, R. De Renzi, C. Buccia *et al.*. Position-sensitive detectors for muon spectroscopy: Design goals, constraints and perspectives [J]. *Physica B*, 2006, **374**~**375**: 494~497