

线阵非成像式激光辐射源定向方法

王挺峰, 郭 劲

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,
吉林 长春 130033)

摘 要: 探测报知激光威胁源的方向是激光告警必不可少的一项技术指标。从激光告警技术发展的角度,提出了一种采用线阵探测器利用非成像方式测定激光辐射源方向的方法。通过将多个线阵探测器在接收系统中进行布局,首先获得激光源在多个不同一维坐标方向上的角度信息,然后利用坐标转换将这些一维角度信息合成相对于接收系统的二维角度信息,最后根据激光源相对于接收系统的物像几何关系,来测定激光辐射源的方向。文中阐述了该方法的原理及基本结构组成,分析了影响定向精度的误差因素,以柱面透镜作为假想光学接收系统,通过光学分析,验证了该方法的可行性。

关键词: 激光告警; 线阵探测器; 激光辐射源

中图分类号: TN386 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2011)09-1649-04

Method for measuring laser radiation source direction based on one-dimension array detector with non-imaging mode

Wang Tingfeng, Guo Jin

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To acquire the direction information of laser threat source is necessary for laser warning. A new method for measuring laser radiation source direction based on one-dimension array detector with non-imaging mode was put forward from developing laser warning technology. The angular information in multi one-dimension direction was obtained through arrangement of multi one-dimension array detector. The angular information in one dimension direction was transformed into angular information in two dimension with coordinates transform. The laser radiation source direction was measured depending on the geometrical relation between object and image. The principle and the essential configuration layout of this method were expatiated on and the relevant factor of influencing measurement precision was analyzed and the feasibility of this method was testified by using optical analysis.

Key words: laser warning; one dimension detector; laser radiation source

收稿日期: 2011-01-05; 修订日期: 2011-03-13

基金项目: 中科院三期创新项目(O98Y32C100)

作者简介: 王挺峰(1977-),男,副研究员,主要研究方向为光电探测与信息处理技术。Email:wtfeng@sina.com

0 引言

激光告警用于探测、报知敌方的激光威胁源,其中测定激光威胁源所在方向,在激光告警中是最重要且不可缺的。成像探测型激光告警器是当前激光告警技术发展的主流^[1],它采用面阵探测器,基于广角凝视成像体制工作,具有较高的空间角度分辨力。例如,美国 AIL 系统公司研制的 HALWR 高精度激光告警接收机,其定向精度高达 1 mrad, HALWR 中的 CCD 摄像机以非常规的方式工作,帧速最低 10 000 帧/s,最高 125 000 帧/s,能以大于 98% 的拦截概率不同步地探测单脉冲激光^[2]。但由于目前市面上面阵 CCD 的最高帧速仅为 1 000 帧/s,因此只有设计特殊的面阵 CCD 才能满足激光告警的需要,这就增加了成像探测型激光告警技术的难度。与面阵 CCD 相比,线阵 CCD 可以获得更高的帧速,若能用线阵探测器代替面阵探测器,则可以大大降低上述激光告警技术的难度^[3-4]。因此文中对利用线阵探测器代替面阵探测器测定激光辐射源方向的方法进行了研究。

1 定向方法的基本结构组成

双线阵结构是利用线阵探测器测定激光辐射源方向的最基本结构,此时,定向系统由两组线阵结构单元组成。线阵结构单元主要由对激光成像为一线斑的光学接收系统、狭缝、滤光片、线阵探测器和电路系统组成。线阵探测器位于光学接收系统的焦平面处,光学接收系统所在面与线阵探测器的接收面平行,光学接收系统、狭缝和线阵探测器的形心对齐,线斑与狭缝方向一致,线斑与线阵探测器交叉成十字形状。两组线阵结构单元之间的布局关系是:光学接收系统位于同一个平面内,彼此之间正交;相对应的线阵探测器也位于同一个平面内,彼此之间也正交。其结构布局如图 1 所示。

光学接收系统收集来自激光源的辐射,由于该系统具有光学增益,因而可以保证定向系统具有一定的探测距离。狭缝作为孔径光阑,用来调节进入到光学系统的辐射通量的大小,光学系统接收到的激光辐射通量的大小由狭缝的宽度决定,狭缝的宽度可调,这使得定向系统具有一定的动态测量范围。滤光片用来抑制背景杂光,仅使位于光谱通带范围内

的激光透过,这样通过降低背景噪声,又进一步提升了定向系统的探测距离。线阵探测器用来测量激光线斑的位置,用于后续的数据处理。

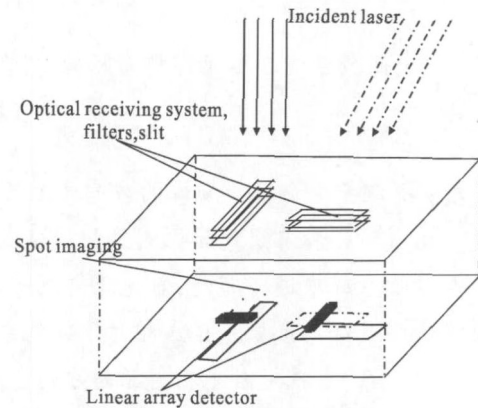


图 1 定向方法的基本结构布局示意图

Fig.1 Diagram of basic structure and layout of orientation method

2 定向原理

采用笛卡儿直角坐标系表示的双线阵结构定向系统的测量坐标系如图 2 所示,测量坐标系中的 z

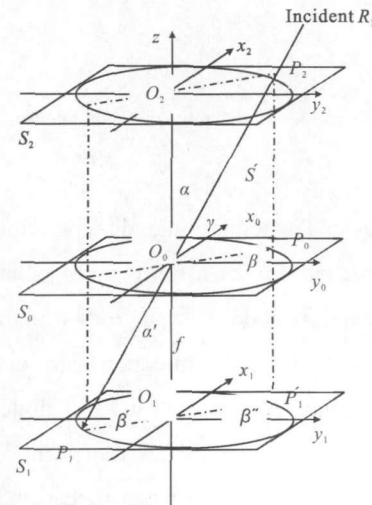


图 2 激光辐射源方向测量空间示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser radiation direction of the measurement space

轴表示定向系统的虚拟光轴, x_1 轴和 y_1 轴表示线阵探测器, 定向系统测量坐标系的中心即线阵探测器的中心。图中 S_0 平面表示光学接收系统所在面, S_1 平面表示探测器的接收面, S_2 平面表示辐射源所在面; S_0 平面、 S_1 平面和 S_2 平面三者平行。假定激光源位于 S_2 平面的 P_2 点处, 则在二维成像的前提下, 入射激光相对于定向系统的空间分布如图 2 中所示,

P_1 点为激光虚拟光斑位置, S' 面即入射光线与定向系统虚拟光轴构成的子午面。入射光线在子午面内的追迹如图 3 所示。

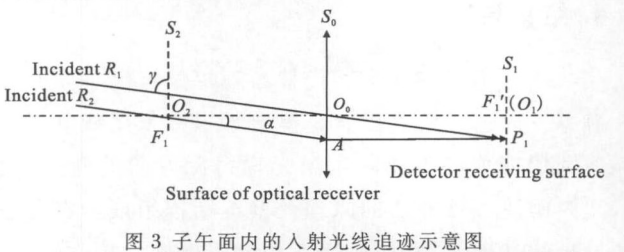


图 3 子午面内的入射光线追迹示意图

Fig.3 Diagram of incident ray tracing of meridional plane

根据图 2 和图 3 中的几何关系可知: γ 角即入射激光相对于定向系统的俯仰角, β 角即入射激光相对于定向系统的方位角。

根据图 3 中的几何关系, 有:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha \tag{1}$$

$$\alpha = \alpha' = \arctan\left(\frac{|P_1O_1|}{f}\right) \tag{2}$$

式中: f 表示光学系统的焦距; $|P_1O_1|$ 表示虚拟光斑距定向系统中心的偏移量。

根据图 4 中的几何关系, 虚拟光斑距定向系统中心的偏移量为:

$$|P_1O_1| = \sqrt{|O_1A|^2 + |O_1B|^2} \tag{3}$$

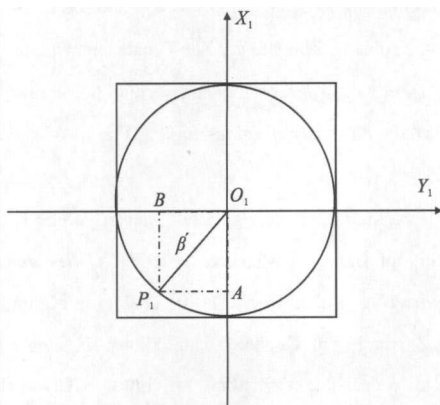


图 4 S_1 面内的激光光斑偏移量示意图

Fig.4 S_1 -plane diagram of the laser spot offset

则根据公式(1)~公式(3), 可得计算俯仰角的表达式为:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\sqrt{|O_1A|^2 + |O_1B|^2}}{f}\right) \tag{4}$$

式中: $|O_1A|$ 表示偏移量 $|P_1O_1|$ 在 x_1 轴上的投影, 即在 x_1 方向上线阵探测器测得的偏移量; $|O_1B|$ 表示

偏移量 $|P_1O_1|$ 在 y_1 轴上的投影, 即在 y_1 方向上线阵探测器测得的偏移量。

根据图 2 和图 4 中的几何关系, 有:

$$\beta = \beta'' = \beta' \tag{5}$$

$$\beta' = \arctan\left|\frac{O_1A}{O_1B}\right| \tag{6}$$

则根据公式(5)和公式(6), 可得计算方位角的表达式为:

$$\begin{cases} \beta = \arctan\left|\frac{O_1A}{O_1B}\right| & \text{激光光斑位于第一象限} \\ \beta = \pi - \arctan\left|\frac{O_1A}{O_1B}\right| & \text{激光光斑位于第二象限} \\ \beta = \pi + \arctan\left|\frac{O_1A}{O_1B}\right| & \text{激光光斑位于第三象限} \\ \beta = 2\pi - \arctan\left|\frac{O_1A}{O_1B}\right| & \text{激光光斑位于第四象限} \end{cases} \tag{7}$$

3 定向方法的可行性分析

定向方法实现的关键在于能成像为一线斑的光学接收系统的设计。由于柱面透镜能对光束成像为线斑, 因此, 以柱面透镜作为假想的光学接收系统对该定向方法的可行性进行了分析。对公式(5)和公式(7)求全微分, 可得定向系统的定向误差表达式为:

$$\Delta\gamma = -\frac{f \cdot (|O_1A| \cdot \Delta|O_1A| + |O_1B| \cdot \Delta|O_1B|)}{(f^2 + |O_1A|^2 + |O_1B|^2) \cdot \sqrt{|O_1A|^2 + |O_1B|^2}} \tag{8}$$

$$\Delta\beta = \pm \frac{|O_1B| \cdot \Delta|O_1A| - |O_1A| \cdot \Delta|O_1B|}{|O_1A|^2 + |O_1B|^2} \tag{9}$$

式中: $\Delta|O_1A|$ 和 $\Delta|O_1B|$ 表示偏移量的测量误差。

依据上述误差公式可知, 定向方法的定向精度与光学系统焦距、线斑偏移量和偏移量测量误差有关。由于这些影响因素又取决于光学接收系统的性质, 因此采用 CodeV 软件对柱面透镜的性质进行了分析, 分析结果如下。

(1) 线斑偏移量与激光入射方向和透镜曲率有如下规律: 线斑偏移量随激光斜入射方向增加而增大, 随透镜曲率半径增大而增大, 其关系曲线如图 5 所示。当激光以 0.08 rad (约 5°) 的方向斜入射, 采用曲率半径为 30 mm 的柱面透镜时, 偏移量约为 10 mm (见图 5(a)); 当采用曲率半径为 60 mm 的柱面透镜时, 偏移量约为 20 mm (见图 5(b))。

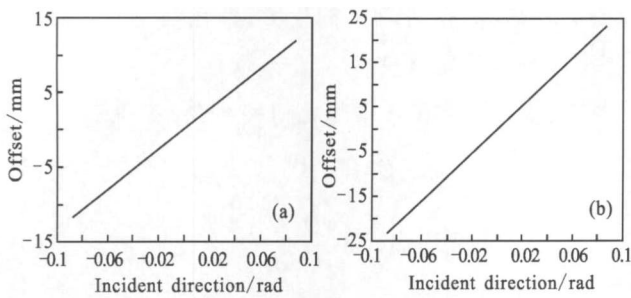


图 5 线斑偏移量与激光入射方向和透镜曲率的关系曲线

Fig.5 Curve of line offset of spot vs the laser incident direction and lens curvature

(2) 影响偏移量测量误差的像差与激光入射方向和透镜曲率有如下规律：球差随激光斜入射方向的增加而增大，随透镜曲率半径的增大而减小，其关系见图 6。当激光正入射时，对曲率半径为 60 mm 的柱面透镜，线斑在焦平面上由于球差的展宽为 0.033 mm；对于曲率半径为 30 mm 的柱面透镜，线斑在焦平面上由于球差的展宽为 0.13 mm。当激光以 5° 方向斜入射时，对于曲率半径为 60 mm 的柱面透镜，线斑在焦平面上由于球差的展宽为 0.76 mm；对于曲率半径为 30 mm 的柱面透镜，线斑在焦平面上由于球差的展宽为 0.85 mm。

理论计算表明，当采用曲率半径为 60 mm 的柱面透镜作为光学接收系统，在接收视场不大于 10° 时，能保证定向方法的定向精度优于 0.3°；在接收视场大于 10° 时，由于柱面透镜的球差随激光斜入射方向的增大而明显增加，定向方法的定向精度会降

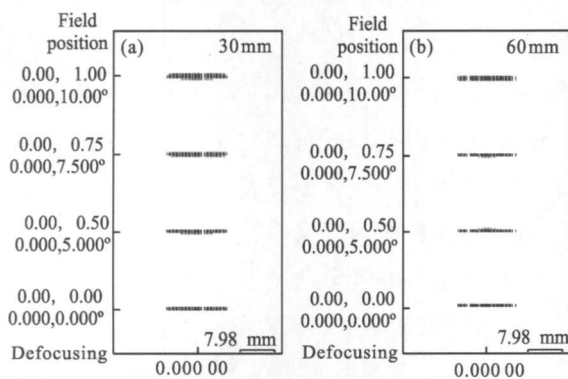


图 6 柱面透镜像差与透镜曲率和激光入射方向的关系

Fig.6 Relationship between cylindrical lens aberrations and lens curvature and direction of the incident laser

低。虽然如此，但却证明采用线阵探测器测定激光辐射源方向的方法是可行的。

4 结束语

从采用线阵探测器代替面阵探测器测定激光辐射源方向这一角度出发，提出了一种采用线阵探测器利用非成像方式测定激光辐射源方向的新方法。文中阐述了该方法的原理及基本结构组成。在理论分析的基础上，以柱面透镜作为假想光学接收系统，通过光学分析证明了该方法的可行性。与同样具有高定向测量精度的面阵成像探测型方法相比，在小接收视场的前提下，该定向方法系统结构简单，电路设计容易，在工程上更易实现。

参考文献：

- [1] Liu Jingjiao. Optoelectronic Countermeasures Technology and Systems[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [2] Jian Li. Foreign Optoelectronic Countermeasures Equipment manuals [Z]. Beijing: Ordnance Research Institute 210, Chinese Academy of Ordnance, 1998. (in Chinese)
- [3] Li Guoning, Liu Yanyan, Jin Longxu. Area CCD imaging system used in moving target tracking [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(3): 558-564. (in Chinese)
- [4] Dong Xiaogang, Zhu Haijun, Xie Yongcheng. Online acquisition and speedy analysis of the nanosecond pulse laser image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (1): 57-61. (in Chinese)
- [5] Jin Longxu, Li Guoning, Liu Yanyan. Design of driving circuit for frame transfer area CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(6): 1140-1145. (in Chinese)
- [6] Lei Zhiyong, Liu Qunhua, Jiang Shoushan, et al. Integrative image processing algorithm for linear CCD [J]. *Optical Technology*, 2002, 28(5): 475-477. (in Chinese)
- [7] Bai Lianfa, Zhang Yi, Chen Qian, et al. Some questions in the realization of range gated imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 57-62. (in Chinese)
- [8] Hilland D H, Phipps G S, Jingle C M, et al. Satellite threat warning and attack reporting [C]//IEEE Proceeding, 1998, 2: 207-217.