

基于柱透镜的非成像式激光定向方法

李冰,赵跃进,褚旭红,孔令琴,张镜水,王鹏,朱维文

(北京理工大学光电学院,北京 100081)

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。针对目前的告警系统的缺点,提出了一种基于柱透镜的高精度激光告警方法,并采用非成像方式对来袭激光进行定向。系统由两个相互垂直的线阵结构组成,线阵结构包括柱透镜组与线阵红外焦平面阵列。告警系统通过来袭激光在线阵焦平面阵列上线斑的偏移量来确定入射激光的水平方位角和俯仰角,从而达到对来袭激光进行定向的目的。文中阐述了该方法的基本原理及系统的结构组成,进行了误差分析,并对光学系统进行了仿真实验。实验结果表明:基于该方法的激光告警系统的视场角达到 $\pm 16^\circ$ 。该方法对激光告警系统在汽车、飞机以及卫星上的应用具有十分重要的指导意义。

关键词:激光告警; 线阵探测器; 柱透镜; 精确定向

中图分类号: TN977 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0611-05

Method for measuring laser incident direction based on cylindrical lens with non-imaging mode

Li Bing, Zhao Yuejin, Chu Xuhong, Kong Lingqin,
Zhang Jingshui, Wang Peng, Zhu Weiwen

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Acquiring the direction information from the laser threat is one of the most crucial techniques of laser warning. This paper focused on a novel method which based on cylindrical lens and measuring laser incident direction with non-imaging mode to acquire the direction information. The laser warning system was composed of two perpendicular linear array devices, each of which included a cylindrical lens group and a linear IRFPA. The laser incident direction was defined by azimuth and pitch angle which could be calculated by the offset of line spot in the IRFPA. The principle of this method, the structure of laser system, the error analysis were mainly discussed in this paper. And a simulation was made in the end. The simulation result shows that this new kind of laser warning system can achieve pitch angle of $\pm 16^\circ$ is valuable for applying laser warning system on motor vehicles, planes and satellites.

Key word: laser warning; linear IRFPA; cylindrical lens; precise orientation

收稿日期:2012-07-11; 修订日期:2012-08-13

基金项目:2010北京市优博指导教师科研项目(YB20101000701);国家自然科学基金(61036006、61177094)

作者简介:李冰(1984-),男,博士生,主要从事红外成像方面的研究。Email:libing0804@126.com

导师简介:赵跃进(1958-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事电子稳像、THz成像技术、基于MEMS的红外成像技术等方面研究。Email:yjzhao@bit.edu.cn

0 引言

随着激光技术在制导、侦查等领域的应用突飞猛进,世界各国都在大力发展激光武器,其破坏力已经严重威胁到各种军用和民用设施,如飞机、卫星等等。因此,激光告警系统已经成为现代化防御体系重要组成部分。激光告警用于感知来袭激光,并且可以精确计算出激光的入射方向,从而确定激光源的准确方位。目前,大部分激光告警系统都采用凝视型的光学成像式探测方法^[1],克服了扫描式所带来的大体积、高功耗等缺陷。但是,由于需要对很大范围进行凝视监视,因而需要很大的成像视场。并且由于强激光的在 1~10 s 内就可以对目标造成伤害,因此需要大面阵、高帧速的 CCD/COMS 图像传感器,普通的 CCD/COMS 很难达到这些要求。例如,美国 AIL 公司所研制的高精度激光告警系统所采用的 CCD 最低帧速为 10 000 帧/s,最高帧速为 125 000 帧/s^[2],而目前市面上一般的面阵 CCD 最高帧速仅为 1 000 帧/s。因此,必须采用特制的成像设备才能满足告警需求,这就增加了整个系统的难度以及成本^[3-8]。针对这种情况,文中采用柱透镜光学系统以及线阵非制冷红外焦平面阵列(IRFPA),不仅可以简化光学结构,而且可以大大降低对探测器性能的要求,实现高精度的激光源定位。

1 定向方法的结构与原理

1.1 定向系统的基本结构

文中所述的激光定向系统由两个相互垂直安放的线阵结构以及信号处理部分组成,如图 1 所示。

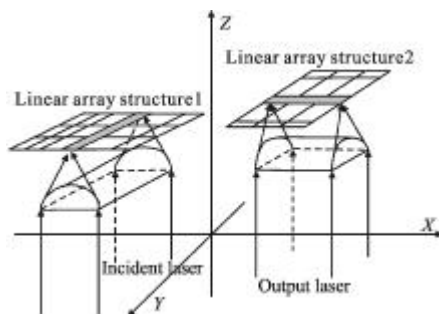


图 1 告警结构示意图

Fig.1 Structure of warning system

每个线阵结构包括柱透镜组、滤光片、三条线阵

IRFPA。三条线阵 IRFPA 并列放置在柱透镜组的焦平面上,并在其前面放置三个中心波长分别为 2.7 μm 、3.8 μm 、10.6 μm 的滤光片用以实现多波长告警。线阵 IRFPA 的中心与柱透镜组的中心对齐,并将二者的中心连线作为整个光学系统的主光轴。柱透镜组与线阵 IRFPA 成“十”字放置。

当来袭激光入射时,通过柱透镜组的入射激光会形成一条与线阵相垂直的线斑。这条线斑通过滤光片后,将会在相应的线阵 IRFPA 上产生告警电信号,如图 2 所示。

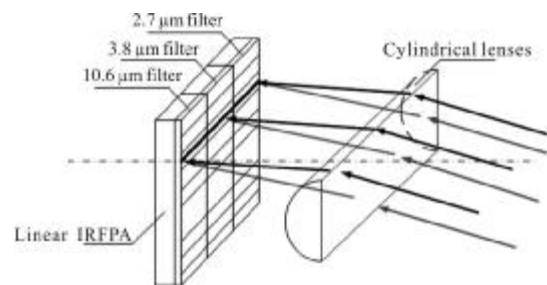


图 2 线阵结构示意图

Fig.2 Structure of linear array device

1.2 定位方法的原理

假设入射光与 Z 轴也就是柱透镜的主光轴所成的俯仰角为 θ , 其在 X-Y 面的投影与 Y 轴所成的水平方位角为 φ , 如果解算出这两个量, 那么就可以确定入射光与三维坐标系的关系, 如图 3 所示。

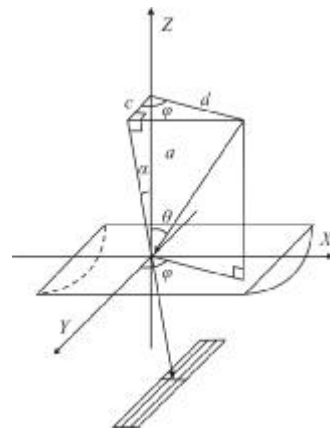


图 3 线阵结构 1 的成像情况

Fig.3 Imaging process on NO.1 linear array device

首先,假设入射光距 X-Y 面的距离为 a , 则入射光在 X-Y 面内的投影长度便可求出, 如公式(1)所示。

$$d = \tan \theta \cdot a \quad (1)$$

其次, 同理可求出入射光在 Y-Z 面内的投影对

于 Z 轴的距离 c, 如公式(2)所示。

$$c = \cos\varphi \cdot d \quad (2)$$

将公式(1)带入公式(2)便可得到各个角度之间的关系。

$$\tan\alpha = \frac{c}{a} = \cos\varphi \cdot \tan\theta \quad (3)$$

对于角度 α 的求解, 可以根据光斑在线阵探测器上的偏移量以及焦距求出。设柱透镜组的有效焦距为 f , 线斑相对于中心位置的偏移量为 e , 由于激光源距离很远, 因此可以将入射激光看作是平行光入射, 如图 4 所示。

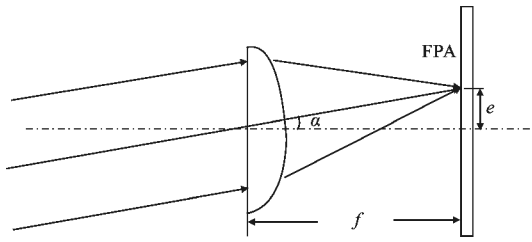


图 4 线斑偏移量与入射角之间的关系图

Fig.4 Relationship between offset of line spot and incident angel

α 的表达式如公式(4)所示。

$$\alpha = \arctg \frac{e}{f} \quad (4)$$

将公式(4)带入到公式(3)中, 得到线斑相对于线阵中心的位置偏移量与入射激光角度之间的关系, 如公式(5)所示。

$$\frac{e}{f} = \cos\varphi \cdot \tan\theta \quad (5)$$

将线阵结构 2 与线阵结构 1 垂直摆放, 入射光的入射方向不变, 在 X-Z 面内的投影与 Z 轴的夹角为 β , 在 X-Y 面的投影与 X 轴所成的方位角为 ϕ , 如图 5 所示。

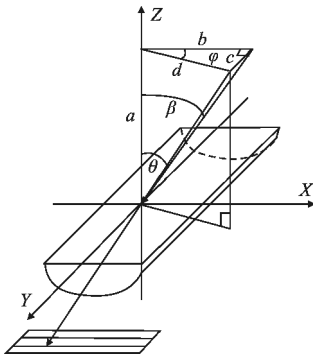


图 5 线阵结构 2 的成像情况

Fig.5 Imaging process on NO.2 linear array device

与线阵结构 1 的推导原理相同, 推导出线斑偏移量与入射激光角度之间的关系, 如公式(6)所示。

$$\begin{cases} \frac{g}{f} = \cos\phi \cdot \tan\theta \\ \phi = 90^\circ - \varphi \end{cases} \quad (6)$$

式中: g 为线阵结构 2 中线斑相对于中心位置的偏移量。将公式(5)与公式(6)联立起来, 就可以推导出两个线阵结构上的线斑的偏移量与入射激光的入射方向之间的关系式, 如公式(7)所示。

$$\begin{cases} \varphi = \arctan \frac{g}{e} \\ \theta = \arctan \left[\frac{g}{f \cdot \sin \left(\arctan \frac{g}{e} \right)} \right] \end{cases} \quad (7)$$

由上式可以看出, 线阵探测器上线斑的位置信息直接反映出来袭激光的入射方向。如果将此种方法应用在卫星激光告警系统上, 结合卫星的轨道高度不仅可以判断入射激光的方向, 而且可以准确的确定激光源的位置。

2 定向方法的可行性分析

实现定向方法的关键在于线阵 IRFPA 上的线斑质量。根据公式(8)可以得到定向系统的误差表达式:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = \frac{e \cdot \Delta g - g \cdot \Delta e}{e^2 + g^2} \\ \Delta\theta = \frac{f \cdot \sin \left(\arctan \frac{g}{e} \right) - e \cdot g \cdot f \cdot \cos \left(\arctan \frac{g}{e} \right)}{f^2(e^2 + g^2) \cdot \sin^2 \left(\arctan \frac{g}{e} \right) + (e^2 + g^2) \cdot g^2} \cdot \Delta g + \\ \frac{f \cdot \cos \left(\arctan \frac{g}{e} \right) \cdot g^2}{f^2(e^2 + g^2) \cdot \sin^2 \left(\arctan \frac{g}{e} \right) + (e^2 + g^2) \cdot g^2} \cdot \Delta e \end{cases} \quad (8)$$

式中: Δe 与 Δg 表示线斑偏移的误差值。

由上式可以看出, 水平方位角的误差只与线斑偏移量及其误差有关; 俯仰角的误差除了与线斑偏移量和偏移误差有关以外, 还与焦距有关。这些误差主要取决于光学系统的性能, 因此文中针对柱透镜的成像特点, 采用 ZEMAX 软件对整个柱透镜光学系统进行设计。仿真得到的系统有效焦距为 $f=37.214 \text{ mm}$, 最大视场角可达 $\pm 16^\circ$ 。

由于两个柱透镜系统是相互垂直的, 因此在进行模拟时只需将入射光相对 X 坐标轴与 Y 坐标轴的角度偏移量进行对换, 就能够分别反映出入射光在

两个系统上的成像情况。以波长为 $2.7\ \mu\text{m}$ 的入射光为例,选取三组数据进行说明。

(1) 当入射光的水平方位角 $\varphi=0^\circ$, 俯仰角 $\theta=11.5^\circ$ 时, 则在 ZEMAX 仿真中, 将 X 轴的角度偏移量设为 0° , Y 轴的角度偏移量为 11.5° 。仿真得出的点列图如图 6 所示。

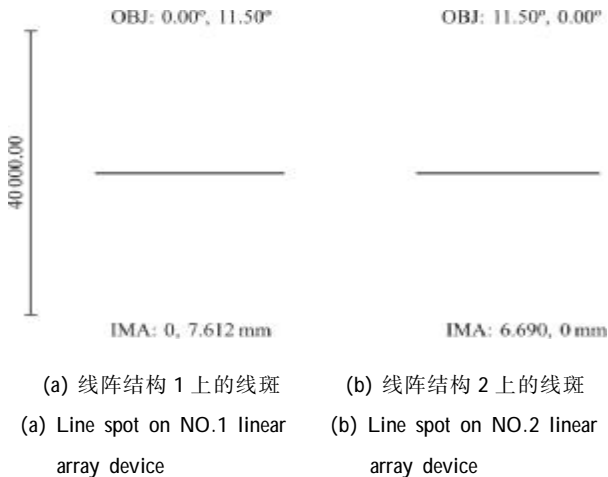


图 6 入射光的点列图

Fig.6 Spot diagram of incident light

由图 6 可见,入射光通过线阵结构 1 时,线斑的像高也就是线斑相对于 IRFPA 中心位置的偏移量为 7.612mm 。在通过线阵结构 2 时,线斑的像高为 0mm ,只是在 X 方向上有偏移但不影响方位的判断。根据这两个偏移量,可以完全反映出入射光的角度信息。线斑的会展会严重影响探测精度,因此需要对其宽度进行严格控制。能量包络图可以反映出宽度的具体情况,如图 7 所示。

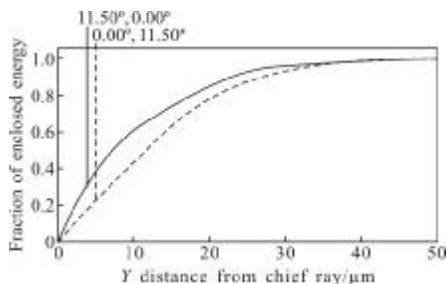


图 7 两个线斑宽度的能量包络图

Fig.7 Enclosed energy diagram of two line spots

从能量包络图可以看出,线阵结构 2 上的线斑的能量曲线要优于线阵结构 1 上的线斑的能量曲线。这是由于柱透镜本身不是中心对称结构,而这种结构会使其在不同方向上有不同的光焦度。通过合

理的透镜设计可以大大减小自身结构所带来的像差。因此,主要的像差是由大角度入射所产生的球差,对柱透镜成像的具体分析在这里不再赘述。

(2) 当入射光的水平方位角 $\varphi=45^\circ$, 俯仰角 $\theta=16^\circ$ 时,则在 ZEMAX 仿真中,将 X 轴的角度偏移量设为 11.5° ,Y 轴的角度偏移量为 11.5° 。仿真得出的点列图如图 8 所示。

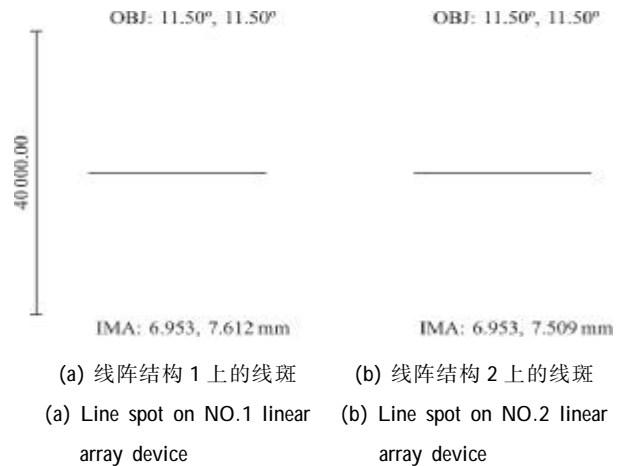


图 8 入射光的点列图

Fig.8 Spot diagram of incident light

由图 8 可见,入射光在像平面上所产生的线斑现对于中心位置的偏移量均为 7.509mm 。这两个量可以完全反映出入射光的水平方位角以及俯仰角。二者的能量分布情况如图 9 所示。

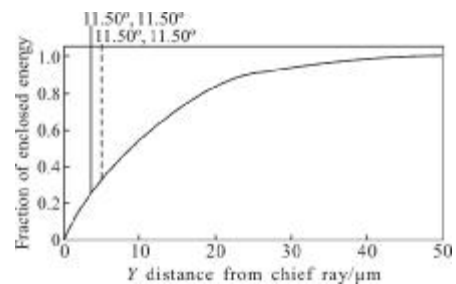


图 9 两个线斑宽度的能量包络图

Fig.9 Enclosed energy diagram of two line spots

从能量包络图可以看出,在入射光的水平方位角 $\varphi=45^\circ$,俯仰角 $\theta=11.5^\circ$ 时,线阵结构 1 与线阵结构 2 的线斑的能量分布情况是相同的。与第一种入射情况相比,线阵结构 1 的能量包络情况要好些,但是线阵结构 2 上的情况则相对差一些。这是因为入射光在线阵结构 2 上的等效入射角度大于 0° ,而在线阵结构 1 上的入射角度小于 11.5° 。

(3) 当入射光的水平方位角 $\varphi=90^\circ$, 俯仰角 $\theta=11.5^\circ$ 时, 与第一种情况一致, 其仿真得出的点列图如图 10 所示。

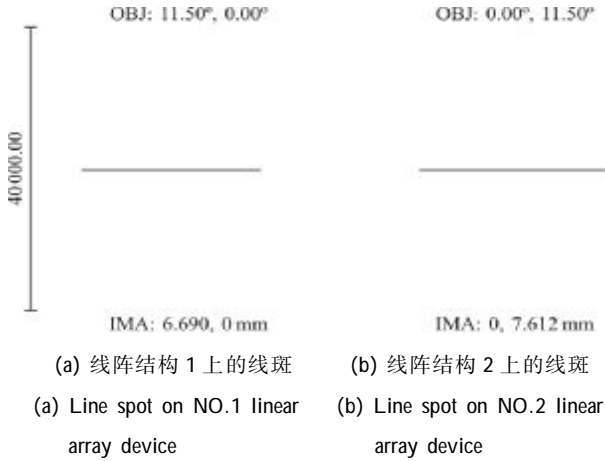


图 10 入射光的点列图

Fig.10 Spot diagram of incident light

由图 10 可以看出, 两个线阵结构上的线斑偏移量与第一种情况完全相反, 这两个量反映出了入射光的角度信息。其能量分布情况如图 11 所示。

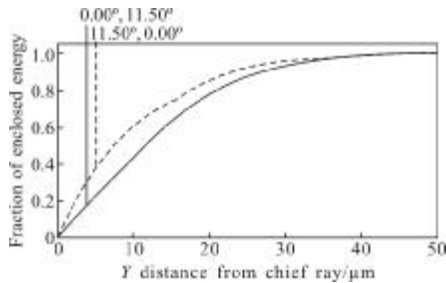


图 11 两个线斑宽度的能量包络图

Fig.11 Enclosed energy diagram of two line spots

由点列图可以看出, 通过柱透镜光学系统的激光在像面上成像为一条线斑, 达到了设计要求, 并且两条线斑相对于中心的偏移量可以完全反映出入射光角度的变化。

线斑的展宽会影响到探测精度, 线斑越宽所占的像素就会越多, 所计算出的偏移量误差就会越大。由能量包络图可以看出, 线斑能量的 90% 都集中在 $50 \mu\text{m}$ 以内, 而目前非制冷线阵 IRFPA 的像素尺寸一般为 $30\sim 80 \mu\text{m}$, 因此这种设计是符合实际使用要求的。由于光阑对入射光的限制作用, 会导致线斑的偏

移量与公式(4)计算出的偏移值具有一定的偏差, 因此需要通过实验定标的方法记录不同方向入射光在 IRFPA 上的位置信息, 从而确定来袭激光的入射方向。

3 结 论

文中从成像式告警系统所存在的缺陷出发, 提出了一种基于柱透镜的非成像式激光定向方法。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, 设计出具有很好性能的柱面透镜光学系统, 并通过光学模拟仿真证明了该方法的可行性。此种方法探测精度高、体积小、信号处理电路简单, 并且可以通过组合多个线阵结构来扩大探测视场。通过进一步的研究可将其应用到实际工作中。

参考文献:

- [1] Yi Ming, Wang Xiao, Wang Long. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 601-607. (in Chinese)
- [2] Hilland D H, Phipps G S, Jingle C M, et al. Satellite threat warning and attack reporting [C]//IEEE Proceeding, 1998, 2: 207-217.
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] Jin Longxu, Li Guoning, Liu Yanyan. Design of driving circuit for flame transfer area CCD[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(6): 1140-1145. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] Li Guoning, Liu Yanyan, Jin Longxu. Area CCD imaging system used in moving target tracking [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 16(3): 558-564. (in Chinese)
- [8] Zhang Jilong, Tian Erming, Wang Zhibing. Laser warning receiver based on sinusoidal transmission grating[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3): 326-330. (in Chinese)