文章编号:1008-0570(2010)09-1-0021-03

基于线阵探测器的激光辐射源定向方法

Method for measuring laser source direction based on one-dimension array detector

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 王挺峰 王地男 张海波 赵 帅
WANG Ting-feng WANG Di-nan ZHANG Hai-bo ZHAO Shuai

摘要: 为减小激光告警技术中面阵凝视成像探测技术的难度,提出了一种采用柱面透镜作为光学接收系统,利用线阵探测器测定激光辐射源方向的新方法。文中阐述了利用线阵探测器测定激光辐射源方向的原理及基本的结构组成,给出了影响定向方法测量精度的误差因素,并利用 code V 光学分析软件对柱面透镜的影响因素进行了定量分析。理论计算结果表明,当采用曲率半径为 60mm 的柱面透镜作为光学接收系统时,在接收视场不超过 10°的前提下,可保证定向精度优于 0.3°。

关键词: 方向; 激光; 线阵探测器; 柱面透镜; 激光告警
中图分类号: TN386 **文献标识码:** A

Abstract: In order to reduce the technical difficulty of staring imaging based on two-dimension array detector in laser warning technology, a new method for measuring laser source based on one-dimension array detector using cylinder lens as the optical system was put forward. The principle and the essential configuration layout of this method were expatiated on. The relevant factor of influencing measurement precision was presented. The relevant influencing factor of cylinder lens was analyzed by using code V optical analysis software. The academic computational result indicated that the measurement precision excels 0.3° using cylinder lens with 60 mm curvature radius as the optical system when the angle of view of system is less than 10°.

Key words: direction; laser; one-dimension detector; cylinder lens; laser warning

技术创新

1 引言

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。基于面阵探测器的凝视成像型激光告警技术能精确识别激光威胁源的方向, 是当前激光告警技术发展的主流。例如,美国 AIL 系统公司研制的 HALWR 高精度激光告警接收机,其方位、俯仰定向精度高达 1mrad,HALWR 的 CCD 摄像机以非常规的方式工作,帧速最低 10000 帧/秒,最高 125000 帧/秒,能以大于 98%的拦截概率不同步的探测单脉冲激光。这么高的帧速对面阵 CCD 的性能以及后续驱动电路、读出电路和数据处理电路的设计都提出了很高的要求, 这也成为制约当前成像探测型激光告警技术发展的一个瓶颈。线阵探测器同面阵探测器相比,在器件性能及后续电路设计上存在优势,虽然不能凝视成像,但利用多个线阵探测器在接收系统中进行布局, 通过测量激光在多个线阵探测器上的光斑位置, 首先获得激光源在多个不同一维坐标方向上的角度信息; 然后通过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, 最后根据物像几何关系,就能测定出激光辐射源的方向。对于激光告警这种要求帧速很高的应用场合,若能采用线阵探测器代替面阵探测器,将大大降低技术难度。因此,本文以柱面透镜作为光学接收系统,对利用线阵探测器测定激光辐射源方向这一方法进行了研究。

2 定向方法的基本结构组成

双线阵结构是利用多线阵探测器测定激光辐射源方向最基本的一种结构,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柱面透镜、狭缝、滤光片、线阵探测器和电路系统组成。线阵探测器和柱面透镜的光心线相互垂直,并位于柱面透镜的焦平面上,柱面透镜、狭缝和线阵探测器的形心对齐。两组线阵结构单元之间的布局关系是: 柱面透镜位于同一个平面内,相互之间垂直;相对应的线阵探测器也位于同一个平面内,相互之间也垂直。其结构布局如图 1 所示。

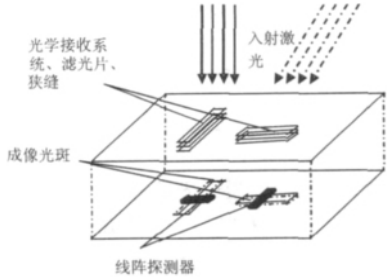


图 1 定向方法的基本结构布局示意图

柱面透镜用来收集来自激光源的激光辐射, 由于它具有一定的光学增益,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,仅让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,用于后续数据处理。

3 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 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 平面表示柱面透镜所在面,S_1

王挺峰: 副研究员 高级工程师 博士

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 中所示。

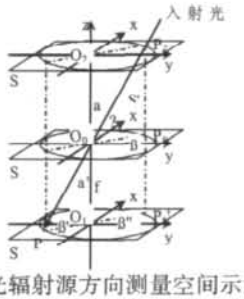


图 2 激光辐射源方向测量空间示意图

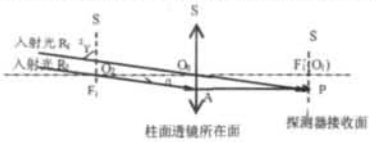


图 3 子午面内的入射光线追迹示意图

根据图 2 和图 3 中几何关系可知: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:

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

$$\alpha = \alpha' = arctg(\frac{|P_1O_1|}{f}) \tag{2}$$

(2)式中,f 表示柱面透镜的焦距;$|P_1O_1|$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:

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

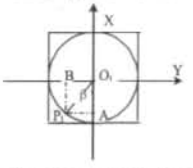


图 4 S_1 面内的激光光斑偏移量示意图

则根据(1)式、(2)式和(3)式,可得计算俯仰角的表达式为:

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

(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:

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

$$\beta' = arctg(\frac{|O_1A|}{|O_1B|}) \tag{6}$$

则根据(6)式和(7)式,可得计算方位角的表达式为:

$$\begin{cases} \beta = arctg(\frac{|O_1A|}{|O_1B|}) & \text{激光光斑位于测量坐标系第一象限} \\ \beta = \pi - arctg(\frac{|O_1A|}{|O_1B|}) & \text{激光光斑位于测量坐标系第二象限} \\ \beta = \pi + arctg(\frac{|O_1A|}{|O_1B|}) & \text{激光光斑位于测量坐标系第三象限} \\ \beta = 2\pi - arctg(\frac{|O_1A|}{|O_1B|}) & \text{激光光斑位于测量坐标系第四象限} \end{cases} \tag{7}$$

4 定向精度分析

对(5)式和(7)式求全微分,可得定向系统的定向误差表达式为:

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

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

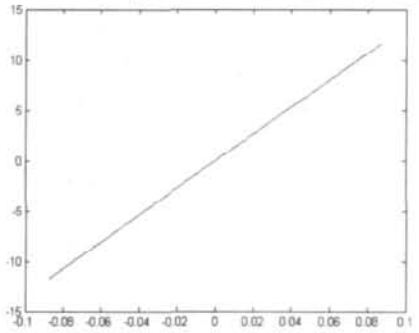
式中，$\Delta|O_1A|$ 和 $\Delta|O_1B|$ 表示偏移量测量误差。

根据上述误差公式可知,定向精度与柱面透镜焦距、线斑偏移量和偏移量测量误差有关。采用 CodeV 光学分析软件,我们对上述影响因素进行了定量分析。

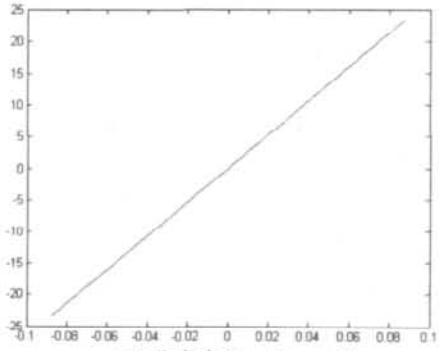
柱面透镜的线斑偏移量随激光斜入射方向增加而增大,随透镜曲率半径增大而增大。分析得到的线斑偏移量与激光入射方向和透镜曲率之间的关系曲线如图 5 所示。当激光以 0.08rad (约 5°)的方向斜入射,当采用曲率半径为 30mm 的柱面透镜时,偏移量约为 10mm; 当采用曲率半径为 60mm 的柱面透镜时,偏移量约为 20mm。

偏移量测量误差主要与柱面透镜球差有关，柱面透镜球差随激光斜入射方向增加而增大,随透镜曲率半径增大而越小。分析得到的影响偏移量测量误差的像差与透镜曲率和激光入射方向的关系如图 6 所示。当激光正入射时,对于曲率半径为 60mm 的柱面透镜,线斑在焦平面上由于球差展宽为 0.033mm;对于曲率半径为 30mm 的柱面透镜、线斑在焦平面上由于球差展宽为 0.13mm。当激光以 5°方向斜入射时,对于曲率半径为 60mm 的柱面透镜,线斑在焦平面上由于球差展宽为 0.76mm;对于曲率半径为 30mm 的柱面透镜,线斑在焦平面上由于球差展宽为 0.85mm。

理论计算表明，当采用曲率半径为 60mm 的柱面透镜作为光学接收系统,在接收视场不大于 10°时,定向精度可保证优于 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低。

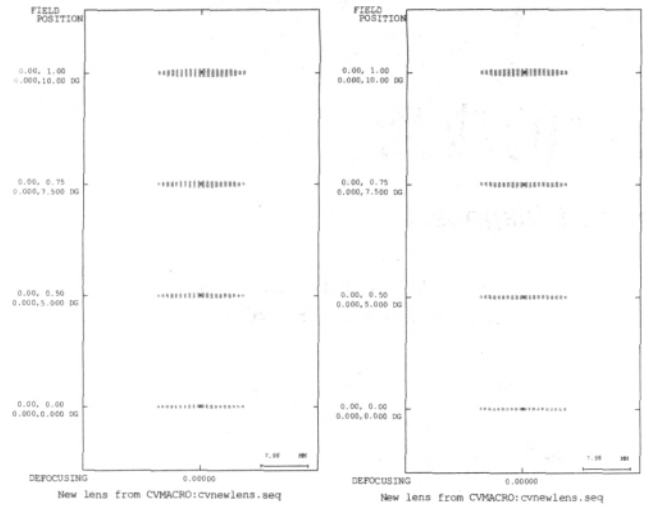


(a)曲率半径 r=30mm 时



(b)曲率半径 r=60mm 时

图 5 线斑偏移量与激光入射方向和透镜曲率的关系曲线(横轴单位:rad,纵轴单位:mm)



(a) 曲率半径 r=30mm　　(b)曲率半径 r=60mm

图 6 柱面透镜球差与透镜曲率和激光入射方向的关系

5 小结

本文以柱面透镜作为光学接收系统,对利用线阵探测器测定激光辐射源方向这一方法进行了研究。文中详细阐述了该定向方法的原理及基本结构组成,依据理论误差分析和 code V 光学分析结果, 计算表明, 当采用柱面透镜作为光学接收系统时,在小接收视场的前提下,该定向方法同样可以具有很高的定向测量精度。与同样具有高定向测量精度的面阵成像探测型方法相比,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]刘京郊.光电对抗技术与系统[M].北京:中国科学技术出版社.2004.

[2]简莉.国外光电对抗器材手册.中国兵器科学研究院兵器工业第 210 研究所.1998.

[3]李国宁,刘妍妍,金龙旭.用于动态目标跟踪的面阵 CCD 成像系统[J].光学精密工程,2008,16(3):558~564.

[4]金龙旭,李国宁,刘妍妍. 帧转移型面阵 CCD 驱动电路的设计[J].光学精密工程,2008,16(6):1140~1145.

[5]孙福佳,李厦.基于 CPLD 和 DSP 的线阵 CCD 检测系统的设计[J].微计算机信息,2007,9-2:225-226.

[6]雷志勇,刘群华,姜寿山等.线阵 CCD 图像处理算法研究[J].光学技术,2002,28(5):475~477.

[7]David H. Hilland, Gary S. Phipps, Gary Newton, Curtis Jingle. Satellite Threat Warning and Attack Reporting [J].1998,IEEE Proceeding:207~217.

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。

Biography:WANG Ting-feng(1977-), Male, born in Changchun of Jilin province, assistant researcher. Now research in design and development of electrical.

(130033 吉林 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 王挺峰　王地男　张海波　赵　帅

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 130033, China) WANG Ting-feng WANG Di-nan ZHANG Hai-bo ZHAO Shuai

通讯地址:(130033 吉林长春市东南湖大路 3888 号长春光机所光电对抗部) 王挺峰

(收稿日期:2009.12.11)(修稿日期:2010.03.11)

(上接第 73 页)

本文作者创新点: 利用状态反馈特征结构配置参数化结果,给出了状态反馈容错控制器的完全参数化设计方法。该方法给出了故障系统的所有容错控制器的参数化表达式。

参考文献

[1]Chang W, Park J B, Lee H J, Joo Y H. LMI approach to digital redesign of linear time-invariant systems [J], IEE, Proc-Control Theory Appl, 2002, 149(4): 297-302.

[2]Ren Z, Tang X J and Chen J. Reconfigurable control system design by output feedback eigenstructure assignment [J], Control Theory and Applications, 2002, 19(3): 356-362.

[3]Wang Guo-sheng, Yang Guo-zhen, Duan Guang-ren. Partial pole assignment by constant gain feedback in two classes of frequency-domain models [J], International Journal of Control, Automation, and Systems, 2007, 5(2): 111-116.

[4]Wang Guo-sheng, Liang Bing, Duan Guang-ren. Reconfiguring second-order dynamic systems via state feedback eigenstructure assignment [J], International Journal of Control, Automation, and Systems, 2005, 3(1): 109-116.

[5] 阎成鸿. 航空发动机容错控制系统设计 [J], 微计算机信息, 2007, 7-1: 63-64.

[6]杨明,张凤鸣,胡永峰. 基于神经网络和向量机的容错控制研究[J], 微计算机信息, 2007, 9-1: 181-182

[7]王侃, 常天庆, 王国胜,基于特征结构配置的容错控制器设计,微计算机信息,2009,2-1: 52-54.

[8] Duan G R, Patton R J. Eigenstructure assignment in descriptor systems via state feedback---A new complete parametric approach [J], Int. J. Systems Science, 1998, 29(2): 167-178.

作者简介:张博(1979-), 男(汉族), 辽宁沈阳人,助教,研究方向:装备自动化; 徐向进 (1973-), 山东烟台人, 工程师, 研究方向:装备管理与维修; 谢永成 (1964-), 河北乐亭人,教授,博士,研究方向:火力控制及其自动化; 王国胜(1975-), 河北迁安人,副教授,博士,研究方向:故障诊断与容错控制。

Biography:ZHANG Bo(1979-), male, (Han nationality), Liaoning Province, Assistant, Major in:Equipment's automation.

(100072 北京 装甲兵工程学院控制工程系) 张　博　谢永成　王国胜

(261041 潍坊 解放军 71375 部队装备部) 徐向进

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China) ZHANG Bo XIE Yong-cheng WANG Guo-sheng

(Department of Equipment, Unit 71375 of PLA, Weifang, 261041, China) XU Xiang-jin

通讯地址:(100072 北京市丰台区杜家坎 21 号装甲兵工程学控制工程系) 张　博

(收稿日期:2009.11.18)(修稿日期:2010.02.18)

《现场总线技术应用 200 例》已出版,
每册定价 55 元(含邮资),汇至
地址: 北京市海淀区中关村南大街乙 12 号天作 1 号楼 B 座 812 室　　微计算机信息　　邮编:100081
电话:010-62132436　010-82168297(T/F)