

激光器阵列测量小视场成像烟幕干扰效能

陆 斌, 吕俊伟

(海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘 要: 为了解决在精确测量面源烟幕对小视场成像的干扰效能时, 单束激光视场小、使用扫描方式时无法解决与烟幕扩散同步的问题, 设计提出采用多个低功率的相同激光器, 经过光束均匀化扩束整形排列形成激光器阵列, 实现对烟幕透过率的空间探测, 利用成像传感器测量烟幕的空间透过率的相对变化率。利用这种方法使用 3×3 均匀扩束激光光束阵列可以在 113.4 m 距离上实现面积为 $2.8 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$ 的面源烟幕测量, 成像 CCD 视场为 $10^\circ \times 10^\circ$, 灰度值小于 230 时的相对变化率误差不大于 0.5%。

关键词: 激光器阵列; 光束均匀化; 整形; 烟幕; 测量

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1161-05

Measurement for smoke efficiency to small scene imaging with laser implements array

Lu Bin, Lv Junwei

(Control Engineering Department of Navy Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The laser beam is the most precise and popular instrument to measure the smoke permeate rate. But in most field testing cases, the scene of laser beam light is too small for the smoke field testing and the synchronization problem is also unavoidable when it works at scanning way. In order to insure the measurement precision for the disturbance effect of smoke to the small scene imaging, it introduces the design of lasers array with multi small power same semiconductor laser after beam homogeneous enlarge shaping. The relative variety rate of room permeating rate can be measured by the imaging sensor. It can measure $2.8 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$ smoke at 113.4 m distance with 3×3 beam homogenous enlarge shaping laser array during the principle test. The scene of CCD is $10^\circ \times 10^\circ$ and the error of relative variety rate is less than 0.5% when grey level is no more than 230.

Key words: laser implements array; light beam homogenization; shaping; smoke; measurement

收稿日期: 2012-09-17; 修订日期: 2012-10-15

基金项目: 国家“863”创新基金(2110AAJ211)

作者简介: 陆斌(1966-), 男, 副教授, 主要从事成像跟踪测量及动态图像处理方面的研究。Email: painel@sina.com

0 引言

烟幕是一种应用广泛的无源干扰手段,具有成本低、使用简易方便等特点。对烟幕消光效果的测量直接影响其对成像跟踪、探测等装备的使用,由于外场烟幕试验代价大、投入高,同时受到多种不可控因素的影响^[1],容易产生导致试验效率不高的问题,因此,科学地选择典型发烟装备进行典型环境条件下的外场试验,并科学、合理、高精度采集相关数据,可以达到事半功倍的效果。

在烟幕测量试验中,激光器是一种不可替代的测量手段,其高亮度、指向性、单色性的特点为烟幕高精度光谱透过率提供可靠的测量手段。目前对烟幕的点源测量方法比较成熟,利用激光器和相应的光谱功率计等可以得到固定方向传输路径的点源烟幕透过率。但是,烟幕在释放条件下绝大多数情况对成像传感器,尤其是对小视场成像(大部分军用成像设备视场不超过 $10^\circ \times 10^\circ$)来说,应以面源的测量方式更为合理。目前,对面源烟幕的激光测量是一个难题,使用单个激光器探测存在通过烟幕的路径差异,沈涛介绍了使用激光器线列扫描方式进行探测,也明确指出由于烟幕本身时刻发生变化,使得扫描与烟幕变化之间存在无法同步而影响测量精度的问题^[2]。

该课题通过多次的野外烟幕测量试验和相关分析后,提出利用激光器阵列通过均匀化光束整形技术,合理设计阈值准则、距离准则、准直准则和视场准则,在相应波段的成像探测器完成非均匀性校正,得到面源烟幕的高精度实时透过率分布,为该类型烟幕的消光效能提供可靠成像干扰依据。

1 光束均匀化激光器阵列

为探测面源烟幕透过率特性,激光器辐射应能够成像器件视场中达到一定的数量的像素数,这个值越接近成像器件的总像素则该次测量的效率越高,也越能够反映烟幕的空间特性。

图 1 所示为外场烟幕试验中单个激光器与激光器阵列的测量方法。

目前,激光器的光斑扩束与均匀化整形、多激光器的均匀整合、单激光器分光已经发展为比较成熟的技术,通过相应光学系统的设计可以实现特定的

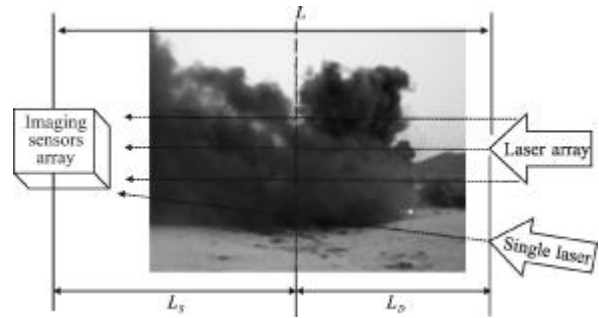


图 1 激光外场烟幕试验测量示意图

Fig.1 Smoke field testing with laser and laser implements array
激光器输出要求,甚至使用毛玻璃就可以实现简单的激光扩束^[3]。图 2 为利用光学组件对激光器光束的扩束,其中图 2(a)为初始光斑与灰度分布,图 2(b)为扩束后光斑与灰度分布。但这些激光器阵列技术多是为了提高激光功率和实现相应的激光光束整形器阵列的合光^[4],在小功率均匀分光扩束技术的应用方面介绍很少。而对于面源烟幕的透过率测量,小功率、均匀化整形的激光器阵列非常适合,因为需要对准成像探测器(如 CCD),必须使功率控制在不影响探测器成像的阈值以下,而均匀化的激光器阵列可比单激光器提供更大辐射的空间辐射角度^[5],提高了实时探测烟幕透过率空间分布的效率。尤其在小视场成像条件下,这种效率的提高是非常明显的,当阵列达到一定数量时,对探测器的视场利用率可接近 100%。

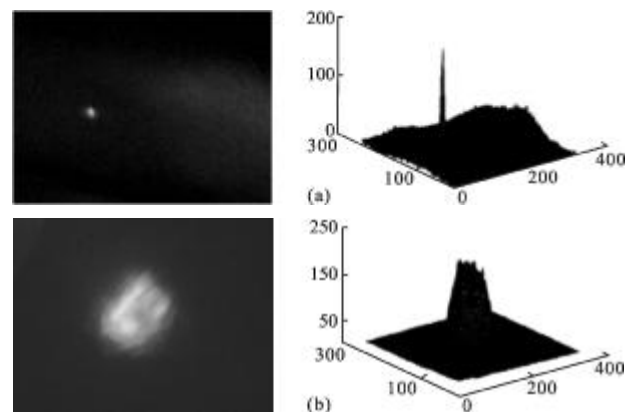


图 2 激光初始光斑与扩束光斑及灰度分布

Fig.2 Laser light beam and extension beam with their grey level

例如,重叠系数为 c (光斑相互重复部分占各光斑总面积的比例)、单个激光器光束视场为 $D(x, y)$, 构成的 3×3 激光器阵列的视场为:

$$D_a(x_a, y_a) = D_a(3xc^3, 3y(1-c)^3) \quad (1)$$

图 3 所示为单个激光器与多个同型号激光器的光斑情况,其中图 3(a)为单个激光光束,图 3(b)为多个光束,箭头所示为相互重叠的部分。

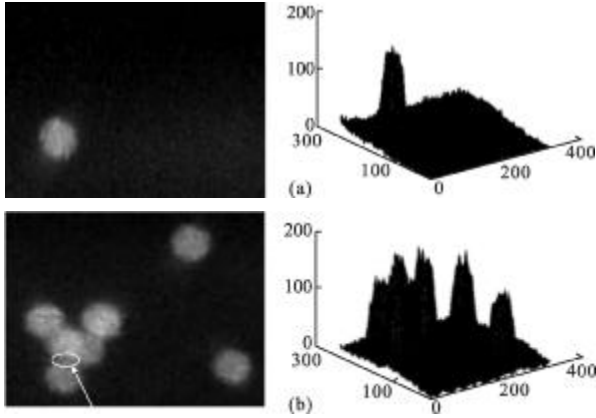


图 3 单个激光光束与多个光束及灰度分布

Fig.3 Single laser beam and multi-beam with their grey level

激光器阵列对烟幕探测使用可以有两种方法。
(1) 各激光器均匀扩束后使用平行光管形成扩束光斑阵列。这种方法的特点是探测光由多个均匀扩束整形后的光斑排列而成^[6],整个光斑均匀、平行、形状质量好,发散角很小,在非均匀性校正时误差影响很小,适合固定的场地和环境、仪器设备保障可靠的情况。
(2) 使用相同参数特性的多激光器形成阵列,依据其发散角参数,在相应的距离产生有一定重叠系数的光斑阵列,形成有一定均匀性的、能够在覆盖成像探测器视场(或一定比例)的光斑^[7]。这种方法的优点是,在明确激光器参数、阈值特性和非均匀性特征时测量使用简单灵活,适合满足激光器与探测器准直条件的野外场合,但这种方法对激光器的光束非均匀性有一定的要求,每次烟幕测量前必须进行非均匀性校正测试。

2 激光器发射功率阈值准则

激光器的功率阈值是面源烟幕探测的重要因素,阈值过高会引起探测器饱和,阈值过低影响对烟幕探测的灵敏度,应依据激光器特性、试验场地空间辐射传输特性和成像探测器特性合理地确定发射功率阈值准则。通常激光器的功率可根据激光器种类、激光衰减光学器件、激光器与成像探测器之间的距离等因素进行调整。李海燕对利用 CCD 成像对相应激光器功率阈值进行了介绍^[8]。图 4 所示为不同距离

上激光器饱和阈值对 CCD 成像,其中图 4(a)为距离 5.6 m,图 4(b)为距离 11.3 m,此时的 CCD 探测器表面平均功率密度为 $9.8 \times 10^{-7} \text{ W/cm}^2$ 。

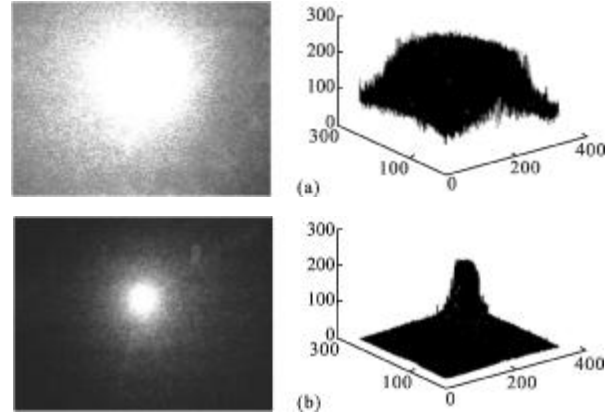


图 4 某型激光器不同距离上在 CCD 的饱和功率阈值及灰度

Fig.4 Threshold power value and grey level at different distance on CCD

传输路径长度为 L 、初始功率为 P_0 、波长为 λ 的激光大气传输后的功率为:

$$P(\lambda) = P_0(\lambda) \exp\left(-\int_0^L \beta dL\right) \quad (2)$$

其中

$$\beta = k_m + \sigma_m + k_a + \sigma_a \quad (3)$$

式中: k_m 、 σ_m 、 k_a 、 σ_a 分别为大气分子与气溶胶的吸收和散射系数。当传输路径释放烟幕时,烟幕作为气溶胶对激光传输产生主要的衰减作用,其影响如公式(4)所示:

$$P(\lambda) = P_0(\lambda) \exp[-\sigma_e(\lambda)L] \quad (4)$$

式中: σ_e 为烟幕的消光系数,与烟幕物质的浓度成正比。

激光器阈值的确定准则应根据 $\exp[-\sigma_e(\lambda)L]$ 的变化规律,对应成像探测器的灰度等级(通常为 0~255),并参照典型烟幕类型与烟幕厚度的消光特性。以饱和阈值为 P_s 、最小探测功率为 P_{NETD} 的成像探测器为例,有

$$P_s > P(\lambda)_{\max} > P(\lambda)_{\min} > P_{NETD} \quad (5)$$

式中: $P(\lambda)_{\max}$ 、 $P(\lambda)_{\min}$ 分别为激光器阵列辐射到探测器靶面的最大和最小功率,这个范围可以通过激光器的本身功率参数、衰减光学组件、激光器阵列与探测器间的距离以及典型烟幕类型来确定^[9]。

根据 $P(\lambda)_{\max}$ 和 $P(\lambda)_{\min}$ 确定对应的探测器靶面辐照度的最大值和最小值,分别用 $E_{s\max}$ 和 $E_{s\min}$ 表示。

以均匀化量化方式计算每级灰度对应的辐射间隔:

$$r = \frac{E_{smax} - E_{smin}}{G_{range}} \quad (6)$$

以此计算确定点(x,y)处的辐照度对应的灰度值:

$$G(x, y) = \text{int} \frac{E - E_{smin}}{r} \quad (7)$$

3 激光器阵列准直与非均匀性校正

在所有的激光测量过程中, 由于激光的高指向性、窄波束特性, 都会涉及到准直技术, 尤其在室外场地和较大测量空间环境时的情况更为明显。在激光器阵列探测过程中需要进行照射方向准直和阵面平行准直的校正, 即确保激光器阵列的光束在探测器成像靶面范围内, 同时激光器阵列与成像靶面处于平行的方向, 前者可以利用可见光波段的激光、光学经纬仪等设备引导, 后者可以使用水平仪、经纬仪等设备修正。

准直误差体现在激光通过烟幕时的路径变化, 即发生“斜程传输”使 $\exp[-\sigma_e(\lambda)L]$ 变小, 这在对烟幕的绝对透过率测量过程中会产生影响。

非均匀性是所有成像探测器件的特点, 对其进行相应的校正可以把误差控制在一定需要的范围内^[10]。激光器阵列的非均匀性校正有几个部分:(1) 阵列发射的光束均匀化;(2) 接收靶面对激光阵列的非均匀标校;(3) 通过得到的非均匀性修正模型, 利用图像处理技术对得到的图像进行非均匀性灰度校正。图 5 所示为单个光束与 3×3 光束阵列及灰度分布, 其中图 5(a)为单个光束, 图 5(b)3×3 光束阵列。

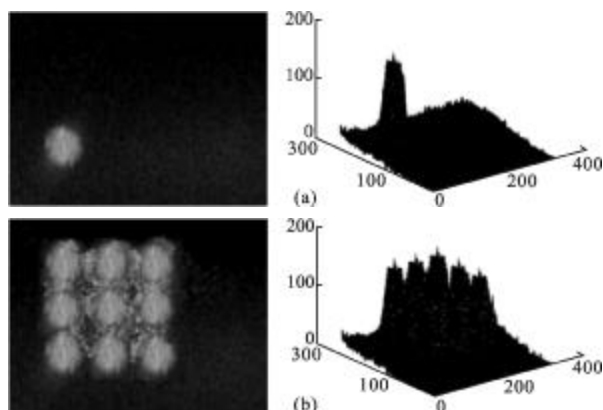


图 5 单个光束与 3×3 光束阵列及灰度分布

Fig.5 Single beam and 3×3 beam array and their grey level

通过对阵列的均匀化处理可以形成成像输出的非均匀性修正的修正函数或矩阵^[11]。

经修正的成像探测输出的图像矩阵关系如下(假设成像面阵为 $m \times n$):

$$D_{(m,n)}^s(x, y) = D_{m,n}(x, y) \times F(m, n) \quad (8)$$

式中: $D_{(m,n)}^s(x, y)$ 为成像传感器通过图像处理进行非均匀性修正后得到的各像素点灰度值矩阵; $D_{m,n}(x, y)$ 为成像传感器得到的各像素点灰度值矩阵; $F(m, n)$ 为通过传感器靶面标校得到的非均匀性修正矩阵。通常成像探测器灰度范围为 0~255, 由于激光光束的非均匀性在高亮度时表现更为显著, 这里取 230 为灰度上限, 而在此上限以下的灰度线性较好, 相对变化率的误差范围可以控制在 1/200(即 0.5%)以内。

4 结论

激光阵列使用小功率、均匀化光束来实现对小视场面源烟幕干扰成像效能的测量, 可以解决单束激光测量范围小而扫描方式又无法解决烟幕变化与扫描同步的时空一致性问题。激光器均匀阵列扩大视场可以缩短激光器与烟幕、接收成像传感器的距离, 为解决激光器准直的难题提供了便利^[12], 同时, 扩大的视场能够更客观、准确地测量烟幕的实时空间透过率特性^[13]。所设计的测量方法利用 3×3 均匀扩束激光光束阵列可以在 113.4 m 距离上实现面积为 2.8 m×2.8 m 的面源烟幕测量, 成像 CCD 视场为 10°×10°, 灰度值小于 230 时的测量误差为不大于 0.5%(灰度大于 230 时做饱和非均匀性处理)。

同时, 通过实验发现这种方法如果测量大面积烟幕时需要增大阵列或增加探测距离, 对准直和光束均匀性提出了更高的要求, 这也是激光器使用领域需要进一步解决的问题。

参考文献:

- [1] Yao Lujia, Gao Junlin. Theory and Testing Technique of Smoke [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
姚禄玖, 高钧麟. 烟幕理论与测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [2] Shen Tao, Song Jianshe. Study on multi-channel measurement of transmissivity of smoke[J]. Electronics Optics & Control, 2007(5): 124-126. (in Chinese)

- 沈涛. 动态烟幕透过率测试方法研究 [J]. 电光与控制, 2007(5): 124-126.
- [3] Lin Yong, Hu Jiasheng. Laser beam shaping techniques [J]. *Laser Journal*, 2008, 6: 1-4. (in Chinese)
林勇, 胡家升. 激光光束的整形技术 [J]. 激光杂志, 2008, 6: 1-4.
- [4] Li Yiyu, Wang Wei, Chen Jiaojie, et al. Beam shaping and homogenization system with lens array for ophthalmic excimer laser refractive surgery [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2011, 081403: 1-4. (in Chinese)
厉以宇, 王伟, 陈娇洁, 等. 基于透镜阵列的眼科准分子激光光束整形与匀光系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 081403: 1-4.
- [5] Du Guojun, Chen Tao. Lens array homogenizer for excimer lasers [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(3): 279-281. (in Chinese)
杜国军, 陈涛. 应用于准分子激光的透镜阵列均束器 [J]. 光电子·激光, 2005, 16(3): 279-281.
- [6] Yi Hengyu, Su Yi. Modeling and experimental validating on array combination of rectangle laser beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 472-475. (in Chinese)
易亨瑜, 苏毅. 矩形光束合成的建模与实验验证 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 472-475.
- [7] Yang Pengling, Feng Guobin. Mid-infrared high energy laser beam detector array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 7: 070200821-070200826. (in Chinese)
杨鹏翎, 冯国斌. 中红外激光光斑探测阵列 [J]. 中国激光, 2011, 7: 070200821-070200826.
- [8] Li Haiyai. Research for the efficacy of laser to IR imaging guiding system [D]. Changsha: Defense Science and Technique University, 2005. (in Chinese)
李海燕. 激光对红外成像制导系统干扰效能研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [9] Jiang Sanping, Hao Xiaojian. Vertical coordinates measurement based on laser screen and photodiode arrays [J]. *Journal of Ballistics*, 2011, 3: 89-92. (in Chinese)
姜三平, 郝晓剑. 基于激光光幕和光电二极管阵列的立靶坐标测量 [J]. 弹道学报, 2011, 3: 89-92.
- [10] Chen Qiuling, Xu Wenhai. Test of beam homogeneity of plane-array laser's output light pane [J]. *Jouranal of Dalian Maritime University*, 2007, 33: 44-46. (in Chinese)
陈秋玲, 许文海. 半导体激光器阵列发光面光束均匀度的特性测试 [J]. 大连海事大学学报, 2007, 33: 44-46.
- [11] Zhao Baoyin, Duan Kaiqiong. Research of the testing for the 2×2 laser beam array synthesise [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 58-62. (in Chinese)
赵保银, 段开棕. 2×2 全光纤激光器阵列部分相干合成的实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 58-62.
- [12] Fan Zengming, Li Zuo. Laser beam shaping system of non-spherical surface lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 353-357. (in Chinese)
范增明, 李卓. 非球面透镜组激光光束整形系统 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 353-357.
- [13] Liu Xiangcui, Cheng Xiang. Shield ration measurement of smoke to the IR thermometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 37-42. (in Chinese)
刘香翠, 程翔. 烟幕对红外热像仪遮蔽效果的定量表征 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 37-42. (in Chinese)