

文章编号: 1672-8785(2014)04-0025-06

利用激光器阵列方法测量烟幕 对红外辐射的干扰效能

陆 斌¹ 闫 喆²

(1. 海军航空工程学院控制工程系, 山东烟台 264001 ;

2. 海军航空工程学院研究生 4 队, 山东烟台 264001)

摘 要: 针对目前常用的单通道和多通道激光器测量方法的机理和无法解决的实时测量问题, 提出了利用激光器阵列方法测量烟幕对红外辐射的干扰效能的思想。利用红外激光器均匀化整形等技术实现了对烟幕干扰红外成像时红外透过率的实时测量, 解决了由于烟幕在红外成像视场中不断变化所带来的透过率测量随机性问题。通过计算典型试验条件下各方法的测量结果, 给出了测量精度改进的定量分析。

关键词: 红外; 干扰效能; 烟幕; 测量; 激光器阵列

中图分类号: TN972 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.04.005

Measurement of Jamming Efficiency of Smoke against Infrared Radiation with Laser Array

LU Bin¹, YAN Zhe²

(1. Control Engineering Department of Navy Aeronautical and Astronautical University,
Shandong Province Yantai City, 264001 China;

2. 4th Graduate Student Team of Navy Aeronautical and Astronautical University,
Shandong Province Yantai City, 264001 China)

Abstract: In terms of the mechanism of common single-channel and multi-channel laser measurement methods and the existing difficult real time measurement problem, an idea to use a laser array to measure the jamming efficiency of smoke against infrared radiation is proposed. By using the homogenized shaping technology for infrared laser beams, the real time measurement of the infrared transmittance of infrared imaging is implemented when smoke jamming is used. The random problem in transmittance measurement caused by the changing of smoke in an infrared imaging field of view is solved. By calculating the measurement results of different methods under a typical test condition, the quantitative analysis is made for the improvement of measurement accuracy.

Key words: infrared ; jamming efficiency; smoke; measurement; laser array

收稿日期: 2013-02-09

基金项目: 国家“863”创新自然科学基金(2110AAJ211)

作者简介: 陆斌(1966-), 男, 辽宁辽阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电探测跟踪及动态图像处理。

E-mail: painel@sina.com

0 引言

烟幕是一种广泛用于对抗红外成像探测和制导武器的无源干扰手段,具有成本低、战术使用简易方便等特点。由于烟幕受多种因素的影响,一旦释放难以控制,因此烟幕武器的研制离不开理论的指导、科学的试验及相应的测试和评估,否则难以确保装备的性能和质量及它在实战使用中发挥最大的潜能^[1]。

在精确测量烟幕干扰效能的试验中,激光器是一种不可替代的测量手段^[2]。由于具有高亮度、指向性和单色性的特点,激光器是测量烟幕高精度光谱透过率的可靠手段^[3]。烟幕对抗红外辐射主要靠的是其吸收和散射电磁波的能力及其形成的有效面积^[4],烟幕的质量浓度和几何尺寸会对这两项性能的参数产生直接影响^[5-7]。

目前激光测量烟幕透过率的方法有单通道测量和扫描式多通道测量方法。由于烟幕自身的实时变化会带来随机性测量误差,因此两种方法都无法真正实现烟幕透过率空间分布的实时测量。本文利用相关激光扩束整形等技术实时测量烟幕透过率的空间分布,以改进烟幕对红外辐射的干扰效能的测量精度。

1 用激光测量烟幕对红外成像干扰效能的基本方法与存在的问题

烟幕点源测量方法的基本机理是利用激光器和相应的光谱功率计等仪器得到固定方向传输路径的点源烟幕光谱透过率^[8]。

然而,在野外进行烟幕外场试验时,测量空间的气象情况、成烟规律和相对位置等诸多因素会使得烟幕的浓度分布、空间尺寸变化规律存在较大的随机性,这会对测量结果产生不利的影响。

烟幕外场光谱透过率试验的一种典型方法是采用单路径通道方式,如图1所示,即在某个固定的透过率测试点采集整个烟幕的透过率数据。这种方法的设计相对简单且容易实施,但会造成烟幕透过率测量值的随机性很大。

为解决单通道方法采样数据点少、随机性大的问题,另一种测量野外动态红外烟幕透过率的方法是多通道测量,如图2所示,即适当增加透过率数据采集点数量。数据测试点的增多可降低透过率测量结果的随机性。多测试点测量烟幕透过率就是对于烟幕形成的遮蔽面在多个传输路径上设置多个数据测试点,每个传输路径形成相应的测试通道,准实时地测量烟幕在不同空间点的光谱透过率。这在一定程度上可降低单通道测量透过率的随机性^[9]。

另一种多通道激光测量红外烟幕透过率的方法是使用单激光源扫描方式,在被测烟幕形成的遮蔽面的两个侧面分开放置一激光源和多台功率计或探测器,激光辐射源按照一定的扫描规律扫描烟幕另一面的功率计或探测器,测量透过率数据并进行相应的处理,完成光谱透过率的多测量数据通道测试。这种方法通过扫描机制扩大了激光通过烟幕的空间路径,进一步降低了烟幕下光谱透过率测量中的随机性。

但是,对于红外成像,尤其是小视场的红外成像(一般的军用红外设备成像视场不大于 $10^\circ \times 10^\circ$),在释放烟幕时,绝大多数情况下烟幕会在视场中占较大面积甚至形成遮蔽。所以,以面源形式的辐射进行测量与处理更为合理^[10]。由于烟幕本身在空间透过率的分布会实时变化,用单一激光器进行测量时烟幕的传输路径存在差异,利用激光器以扫描方式探测时存在扫描与烟幕变化之间无法同步而影响测量精度的问题。目前,对面源型烟幕进行激光实时测量还是个难题。



图1 单通道激光测红外烟幕透过率的方法



图 2 多通道激光测量红外烟幕透过率的方法

2 用激光器阵列测量红外烟幕透过率

目前相关激光扩束、均匀化整形、标校准直等器件和激光器阵列技术已经比较成熟,因此我们可以使用激光器来测量烟幕的红外透过率。

为探测面源烟幕透过率的特性,激光器辐射应能够在成像探测器件视场中形成一定数量的像素,这个值越接近成像器件视场的总像素,测量效率就越高,也越能够反映烟幕透过率的空间特性。单束激光器本身的发散角很小,而测量面源红外烟幕需要大口径、强度均匀的激光束,因此需要对激光器进行扩束处理。

另外测量红外烟幕需要使用强度均匀的激光光束,因此扩束后的激光束需要进行均匀化整形处理,也可以通过光学系统等方面的设计实现均匀化扩束(图 3)。

目前激光器的光斑扩束与均匀化整形^[11]、多激光器的均匀整合^[12]和单激光器分光等技术已经比较成熟,通过相应的光学系统设计可以实现特定的激光输出要求^[13]。利用激光器阵列测量红外烟幕透过率(图 4)主要有以下几个基本步骤和过程:

一是激光扩束。通常在激光器的内部或出口位置安装较小的透射式扩束结构。激光扩束系统一般分为透射式与反射式两种。透射式扩束系统包括一个或多个透镜光学器件。根据不同的目镜类型,透射式扩束系统可划分为伽利略望远镜扩束系统和开普勒望远镜扩束系统。

二是激光束均匀化处理。典型的激光光束均匀化方法是先将激光光束扩束,然后通过光阑使该光束中光强分布较为均匀的部分通过,这

样就可以得到均匀分布的光强;另一种方法是使用不同透过率的光学元件设计需要的分布,即对于激光光束光强大的地方具有较低的透过率,对激光光束光强大的地方具有较高的透过率,从而使激光光束通过不同透过率的光学元件实现均匀分布。这两种方法都不复杂,前一种更为简单,但能量损失较大。对于要保持激光强度的场合,前一种方法并不适用,但对近距离测量红外烟幕的情况却很实用,因为测量烟幕的激光光束需要照射到红外成像探测器的接受靶面上,功率稍大的激光会使其产生饱和效应,因此需要使用功率较低的激光。

三是激光器阵列的排列。与单激光器相比,均匀化的激光器阵列可以提供更大的空间辐射角度,即由多个激光器形成的探测空间可增加烟幕的探测面积,提高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,效率的提高非常明显。当阵列达到一定数量时,探测器视场的利用率可以接近 100%。

四是激光器功率值的确定及调整。激光器的功率是面源烟幕测量透过率实时变化的关键因素,功率过高会引起红外探测器的入射辐射饱和,而激光功率过低会影响探测空间烟幕辐射探测接受的灵敏度。发射功率值的选取应该结合激光器的光谱特性、外场试验的空间红外辐射传输特性及红外成像器件特性^[10]。激光器功率值应依据红外激光成像传感器的种类、激光器对应波段的相关衰减光学器件、激光器与红外探测传感器间的距离等因素进行相应调整。

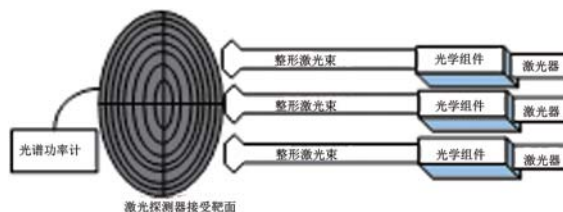


图 3 可用于探测的激光阵列强度的示意图

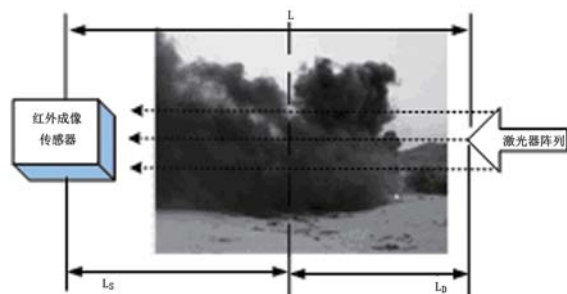


图 4 激光器阵列外场烟幕测量试验示意图

3 测量结果与精度改进分析

使用激光器阵列测量烟幕的空间透过率分布, 相对于目前的单通道激光束测量和多通道扫描测量方法, 由于克服了由烟幕自身变化带来的测量结果的随机性误差问题, 实现了真正的实时测量, 尤其是对于变化较快的烟幕 (一般在烟幕的形成与扩散初段), 测量精度会得到极大的提高。下面对目前使用的单通道和多通道激光测量方法及本文的激光器阵列方法的精度进行对比分析。

对绝对温度为 T 、通量为 ϕ 、辐射立体角为 Ω 、辐射出射面积为 A_s 的点源, 辐射出射度为 M 的红外辐射, 有

$$\begin{cases} M = d\phi/dA_s \\ I = d\phi/d\Omega \\ M_\lambda = dM/d\lambda \\ I_\lambda = dI/d\lambda \end{cases} \quad (1)$$

对光谱辐射强度为 I_λ 点源在距离 r 上形成的辐照度为

$$E_\lambda = I_\lambda \cos \theta / r^2 \quad (2)$$

式中, θ 为探测接受面法向与辐射传输方向的夹角, 一般在工程上由于距离和试验规划, 可基本保持为零。其出射度为

$$M = \sigma T^4 \quad (3)$$

式中, $\sigma = 5.6696 \times 10^{-8} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$ 。视场角为 $\alpha \times \beta$ 的红外成像探测器在距离 l 上可探测到的烟幕范围为 $s_m \times s_n$, 有

$$\begin{cases} s_m = 2 \tan(\alpha/2) \\ s_n = 2 \tan(\beta/2) \end{cases} \quad (4)$$

使用光束发射角为 $\alpha_l \times \beta_l$ 的激光器进行 x 倍率的均匀化扩散, 形成的阵列的探测角为

$$(x \times \alpha_l) \times (x \times \beta_l) \quad (5)$$

3.1 单通道激光测量

单通道激光测量由于探测角形成的探测范围远小于探测距离, 因此其透过率使用点源方法测量, 以某一点 (微面积元) 的透过率作为指定测量范围的透过率平均值。

$$\bar{\tau} = \tau_1 = E_s / E \quad (6)$$

式中, E_s 、 E 分别是有烟幕和无烟幕时探测器上的辐照度。

在 $s_m \times s_n$ 探测范围内, 距离偏差的最大值为中心到边角, 这时探测范围的中心和最大距离边缘的辐照度分别为

$$\begin{aligned} E &= I \cos \theta / r^2 = \frac{I \cos \theta}{l^2} = \frac{M \cos \theta dA_s / d\Omega}{l^2} \\ &= \frac{\sigma T^4 \cos \theta dA_s / d\Omega}{l^2} \\ E'_s &= I' \cos \theta / r'^2 = \frac{I' \cos \theta}{l^2 + (s_m/2)^2 + (s_n/2)^2} \\ &= \frac{M' \cos \theta dA_s / d\Omega}{l^2 + (s_m/2)^2 + (s_n/2)^2} \\ &= \frac{\sigma T'^4 \cos \theta dA_s / d\Omega}{l^2 + (s_m/2)^2 + (s_n/2)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, T' 为探测范围距中心最大偏离距离处的绝对温度。由式 (7) 可知, 辐照度式中分子代表温度的变化, 分母代表距离的变化。在外场试验中, 假设烟幕绝对均匀分布 (实际是不可能的): 当测量距离为 20 m、视场为 $10^\circ \times 10^\circ$ 时, 计算可得 $E' = 85\% E$, 即精度下降到 85%; 对温度变化明显的烟雾 (燃烧型、爆炸型、蒸发型等), 其温度会随着到发烟中心的距离变化而发生明显变化。假设探测中心与边缘的绝对温度从 373 K 变化为 281 K, 计算可得 $E' = 41.7\% E$, 即精度下降到 41.7%。因此该方法更适用于测量温度稳定且分布均匀、距离较远的烟幕。

3.2 多通道扫描激光测量

多通道激光扫描测量是利用单束激光结合扫描机制进行探测的, 所以用多个采集点数据的平均值作为测量范围的通过率。

$$\bar{\tau} = \tau_2 = \sum_{i=1}^a E_{si} / \sum_{i=1}^a E_i \quad (8)$$

由于其扫描一般为准线列方式, 在 $s_m \times s_n$ 探测范围内, 距离偏差的平均最大值为中心到边缘, 这时辐照度为

$$\begin{aligned} E'_s &= I' \cos \theta / r'^2 = \frac{I' \cos \theta}{l^2 + (s_m/2)^2} = \frac{M' \cos \theta dA_s / d\Omega}{l^2 + (s_m/2)^2} \\ &= \frac{\sigma T'^4 \cos \theta dA_s / d\Omega}{l^2 + (s_m/2)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

或

$$\begin{aligned} E'_s &= I' \cos \theta / r'^2 = \frac{I' \cos \theta}{l^2 + (s_n/2)^2} = \frac{M' \cos \theta dA_s / d\Omega}{l^2 + (s_n/2)^2} \\ &= \frac{\sigma T'^4 \cos \theta dA_s / d\Omega}{l^2 + (s_n/2)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

与单通道方法相比, 该方法的精度有一定程度的改善。但由于扫描机制形成的传输路径变化和与烟幕自身变化的不同步, 它会形成无法克服的误差。因此, 对变化明显的烟幕同样无法准确测量。

4.3 激光器阵列测量

当烟幕充满红外成像探测器视场时, 如果用激光器阵列测量烟幕的透过率空间分布, 激光器功率的不均匀、不稳定和红外成像的帧频与烟幕自身变化不同步会使测量产生误差。但由于在测量前进行了激光器阵列的光束整形、稳定性标校、非均匀性校正及红外成像探测器的非均匀性标校, 误差被控制在了很小的范围内, 达到了测量仪器的精度指标量级。红外成像的刷新率与烟幕自身变化不同步是目前所有红外成像探测机理无法避免的问题, 只要在测量过程中保证成像的帧频不低于一般典型红外成像制导的要求即可满足要求。对于烟幕的红外探测, 距离越远, 烟幕自身的变化空间范围越大, 随机性也就越明显。基于这种考虑, 烟幕红外测量的基本安全距离可取为 20 m。

5 结论

利用激光器阵列可以实现烟幕下视场内红外透过率的实时测量, 解决单通道方式和多通道方式中因烟幕在空间和时间上的变化所带来的测量结果随机性问题。表 1 为几种测量方法的比较。

表 1 几种激光测量方法的比较

测量方法	对烟幕变化的要求	测量实时性	测量距离	测量精度	功率要求
单通道	稳定无变化	无	近	低	低
多通道扫描	稳定无变化	准实时	较近	较低	高
激光器阵列	无要求	实时	较远	高	低

参考文献

- [1] 焦清介, 霸书红. 烟火辐射学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 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.
- [3] 郎超, 尧舜. 半导体激光器阵列的 “Smile” 效应对光束质量的影响 [J]. 中国激光, 2012, 39(5): 1-5.
- [4] 郝明明, 朱洪波. 半导体激光阵列光谱合束技术中变换透镜的研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(3): 1-5.

- [5] 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.
- [6] 张磊, 郭劲. 分体式激光扩束系统平行度测量装置的设计 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 789-795.
- [7] 周军, 何兵. 高功率光纤激光阵列被动相干组束技术研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 1-9.
- [8] 梁阔, 冯源. 激光精确制导技术及其干扰技术分析 [J]. 控制与制导, 2011, 2: 80-84.
- [9] 欧阳艺, 臧寿洪. 激光烟幕干扰效果测试布站方法研究 [J]. 激光与红外, 2010, 40(4): 391-394.

- [10] 陆斌, 吕俊伟. 激光阵列测量小视场成像烟幕干扰效能 [J]. *红外与激光工程*, 2013, **47**(4): 31–34.
- [11] Demoustier S, Bellanger C, Brignon A, et al. Coherent Beam Combining of 1.5 μ m Er/Yb Doped Fiber Amplifiers [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2008, **27**(5): 392–406.
- [12] Huang R K, Chann B, Missaggia L J, et al. High Brightness Wavelength Beam Combined Semiconductor Laser Diode Arrays [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2007, **19**(4): 209–211.
- [13] Corcoran C J, Durville F. Passive Phasingina Coherent Laser Array [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron*, 2009, **15**(2): 294–300.
- (上接第 12 页)
- [26] Yang Z Y, Luo T, Jiang S B, et al. Single-mode Low-loss Optical Fibers for Long-wave Infrared Transmission [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(20): 3360–3362.
- [27] Zhang X H, Ma H L, Blanchetiere C, et al. Tellurium Halide IR Fibers for Remote Spectroscopy [C]. *SPIE*, 1994, **2131**: 90–94.
- [28] Blanchetiere C, Le Foulgoc K, Ma H L, et al. Tellurium Halide Glass Fibers: Preparation and Applications [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1995, **184**: 200–203.
- [29] Neindre L, Smektala F, Le Foulgoc K, et al. Tellurium Halide Optical Fibers [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, **242**(2-3): 99–103.
- [30] Le Coq D, Boussard-Pledel C, Fonteneau G, et al. Chalcogenide Double Index Fibers: Fabrication, Design, and Application as a Chemical Sensor [J]. *Materials Research Bulletin*, 2003, **38**(13): 1745–1754.
- [31] Shiryayev V S, Adam J L, Zhang X H, et al. Infrared Fibers based on Te-As-Se Glass System with Low Optical Losses [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2004, **336**(2): 113–119.
- [32] Shiryayev V S, Boussard-Pledel C, Houizot P, et al. Single-mode Infrared Fibers Based on Te-As-Se Glass System [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2006, **127**: 138–143.
- [33] Tao G M, Shabahang S, Ren H. Robust Multi-material Tellurium-based Chalcogenide Glass Fibers for Mid-wavelength and Long-wavelength Infrared Transmission [J]. *Optics Letters*, 2014 (accepted).
- [34] Kosolapov A K, Pryamikov A D, Biriukov A S, et al. Demonstration of CO₂-laser Power Delivery through Chalcogenide-glass Fiber with Negative-curvature Hollow Core [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(25): 25723–25728.
- [35] Churbanov M F, Shiryayev V S, Pushkin A A, et al. Origin of Microinhomogeneities in As-S-Se Glass Fibers Fabricated by the Double-crucible Method [J]. *Inorganic Materials*, 2007, **43**(4): 436–440.
- [36] Furniss D, Seddon A B. Towards Monomode Proportioned Fibreoptic Preforms by Extrusion [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1999, **256**: 232–236.
- [37] Tao G M, Shabahang S, Banaei E H, et al. Multimaterial Preform Coextrusion for Robust Chalcogenide Optical Fibers and Tapers [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(13): 2751–2753.
- [38] Tao G M, Abouraddy A F, Stolyarov A M. Multimaterial Fibers [J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2012, **3**(4): 349–368.
- [39] 许彦涛, 郭海涛, 陆敏, 等. 低损耗芯包结构 Ge-Sb-Se 硫系玻璃光纤的制备与性能研究 [J]. *红外与激光工程*, 2014 (已接收).
- [40] Ropcke J, Davies P B, Lang N, et al. Applications of Quantum Cascade Lasers in Plasma Diagnostics: a Review [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, **45**(42): 423001.
- [40] Parsons M T, Sydoryk I, Lin A, et al. Real-time Monitoring of Benzene, Toluene, and P-xylene in a Photoreaction Chamber with a Tunable Mid-infrared Laser and Ultraviolet Differential Optical Absorption Spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(4): 90–99.
- [42] Lucas P, Boussard-Pledel C, Wilhelm A. The Development of Advanced Optical Fibers for Long-wave Infrared Transmission [J]. *Fibers*, 2013, **1**: 110–118.
- [43] Yang Z Y, Gulbitten O, Lucas P, et al. Long-wave Infrared Transmitting Optical Fibers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, **94**(6): 1761–1765.
- [44] 孟伟, 郭海涛, 许彦涛, 等. 硫系红外玻璃材料耐辐照性能研究进展 [J]. *硅酸盐学报*, 2012, **40**(8): 1229–1235.