

doi:10.3788/gzxb20134203.0258

# 近红外激光照明器均匀性评价技术研究

王英顺, 连洁, 高尚, 王晓, 孙兆宗

(山东大学 信息科学与工程学院, 济南 250100)

**摘 要:** 近红外激光照明是在低照度情况下, 用近红外激光作为光源对远距离目标进行主动照明. 由于激光的产生机制、匀光装置和照明器采用的光学系统公差、大气湍流等因素, 近红外激光光束在目标面上的光强空间分布不均匀, 对成像、观测准确度产生较大影响. 本文提出采用近红外激光光强功率谱衡量照明近红外激光光强分布均匀性, 即采用归一化后光强功率谱所围成的面积作为衡量近红外激光照明均匀性的参量. 利用这种方法, 对不同的近红外激光照明器, 在相同的工作状态下的照明均匀性评估参量进行了研究, 结果验证了采用归一化后光强功率谱所围成的面积作为评价参量的合理性.

**关键词:** 近红外激光照明; 功率谱; 照明均匀性; 均匀性评价参量

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)03-0258-4

## Illumination Uniformity of Near Infrared Illuminator

WANG Ying-shun, LIAN Jie, GAO Shang, WANG Xiao, SUN Zhao-zong

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

**Abstract:** Near infrared laser illumination is in low illumination situation, using near infrared lasers as the light source for long-distance target active lighting. Because of the laser generation mechanism, the optical system tolerance, atmospheric turbulence and other factors, the laser intensity spatial distribution on the target plane is not uniform, which has great impact on image resolution and tracking accuracy. In this paper, the area surrounded by normalized PSD (power spectral density) is adopted to evaluate the near infrared laser illumination intensity uniformity. Using this method, different near infrared laser illuminator's uniformity evaluation parameters are studied, in the same work condition. The results verify the reasonableness of the laser power spectrum as an evaluation parameter.

**Key words:** Laser illumination; Illumination uniformity; Power spectral density; Uniformity evaluation parameter

## 0 引言

近红外激光照明是在低照度的情况下, 采用近红外激光作为光源对远距离的目标进行主动照明, 以便于用探测器对目标成像和精确跟踪. 由于激光具有亮度高、方向性好等优点, 激光作为照明光源具有明显优势. 近红外激光照明可以应用到多种场合下目标的成像探测、识别和定位, 例如武器系统的探测、识别、定位、跟踪等, 还可以用于搜救, 监视系统,

水下目标的探测<sup>[1-2]</sup>等. 目前市场上的远距离激光红外夜视仪, 采用主动近红外激光夜视技术, 所用的照明设备就是近红外激光照明器, 夜间作用距离可达 2000 米, 可以不受外界照明条件影响, 昼夜连续监控. 然而, 受激光产生机制限制, 激光具有很高的相干性, 并且通常激光光强分布呈高斯分布, 使得在采用近红外激光作为照明光源时, 要使用必要的匀光装置和光学变焦元件. 受激光的产生机制、匀光装置和光学调焦元件的公差<sup>[3-4]</sup>、大气湍流<sup>[5-6]</sup>等因素的

基金项目: 国家基础研究基金(No. 2009CB929401)和山东省自然科学基金(No. ZR2009GM023)资助.

第一作者: 王英顺(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光照明测试和激光在大气中的传输变换. Email: wtrident@163.com

导师(通讯作者): 连洁(1964—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光电探测器、半导体材料光学性质、量子阱超晶格材料特性和非线性光学等. Email: opticsdu@163.com

收稿日期: 2012-08-15; 录用日期: 2012-11-20

限制,照明激光束在目标面上的光强分布并不均匀,严重时会出现暗斑,或者干涉条纹等,对照明效果有很大的影响.目前对于近红外激光照明的评价还没有成熟的方法.本文提出了采用归一化后光强功率谱所围成的面积评价照明激光光强分布均匀性.对采用不同匀光方式的近红外激光器的照明均匀性进行研究.结果验证了新方法的合理性.

## 1 理论

在实际应用中,对近红外激光照明通常采用的评价参量有以下几种:

调制度<sup>[7]</sup>:光强最大值与最小值之差同光强最大值与最小值之和的比值.

$$M = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (1)$$

$I_{\max}$ 为取样点中的最大光强, $I_{\min}$ 为取样点中的最小光强.

对比度:指的是一幅图像中明暗区域中最强光强和最弱光强之间不同强度层级的测量.

$$I = I_{\max} / I_{\min} \quad (2)$$

填充因子:光强的平均值与光强的最大值的比值,即

$$F = I_{\text{avg}} / I_{\max} \quad (3)$$

$I_{\text{avg}}$ 为所有取样点的平均光强.

光强起伏方差<sup>[8]</sup>:光强起伏方差是实际中常用的衡量光强起伏强弱的指标.

$$\sigma = \sqrt{\sum_i (I_i - I)^2 / N} \quad (4)$$

式中  $I_i$  是目标面上取样点  $i$  处光强,  $I$  为目标面上的平均光强.  $N$  为取样点的个数.

光强起伏方差是衡量激光照明器光斑均匀性的重要参量,它可以反映目标面上光强总的起伏强弱.

平顶因子<sup>[9]</sup>:平顶因子反映了整个光斑能量分布范围内的均匀性.要得到光斑的平顶因子需要首先获得加工窗口和能量分数.加工窗口即可以允许地激光功率密度的变化百分比.加工窗口可以衡量光束起伏变化的幅度,但是不能反映光束能量的利用率.能量分数描述了光束能量达到加工窗口的能量占光束总能量的百分比,表示了能量的利用率.对于同一光束,不同的加工窗口下,能量分数可能不相同.根据不同的加工窗口下的光斑能量分数,作归一化的能量分数-能量密度曲线.对阈值能量-分数曲线下的面积做积分,得到面积即为平顶因子.平顶因子越接近于 1,光束的均匀性越好.理想均匀光束的平顶因子为 1.

由式(1)~(3)容易得出调制度、填充因子、对比

度等三种评价参量受取样点的光强影响比较大,容易受探测器分辨率、噪音等因素的影响.这三种参量不能反映目标面光强起伏强弱和光强的空间分布,不能全面地衡量照明光束的均匀性.光强起伏方差可能反映目标面上光强总的起伏强弱,但是不能反映光强的空间分布情况.平顶因子通常用来衡量激光光场分布的均匀性,不适合用来评价照明激光的光强均匀性.以上提到得评价参量侧重点不同,但都不能客观、全面地衡量近红外激光照明的均匀性.

在实际的激光照明测试中,光强的空间分布对照明效果的影响非常大.采用以上几种光强均匀性评价参量不能很好地反映光强的空间分布对照明效果的影响.采用光强的功率谱密度可以较好地反映光强空间分布对照明效果的影响.将光强图像变换到频域角度分析信号的特征,采用快速傅里叶算法,可以很方便地计算图像的频谱曲线,为采用频谱分析法衡量光强均匀性提供极大的方便.图像的离散傅里叶变换定义为

$$H(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} \exp\left(-2\pi i y \frac{v}{M}\right) \cdot \exp\left(-2\pi i x \frac{u}{M}\right) h(x, y) \quad (5)$$

式中  $u, v$  为频率分量,  $x, y$  为空间图像变量.为方便观察,将得到的图像进行平移变化,使图像的直流分量出现在频谱图的中心位置,越远离中心,频率越高.定义为

$$|H(u, v)|^2 = H(u, v) H^*(U, v) \quad (6)$$

式(6)为图像的功率谱<sup>[10]</sup>.功率谱是图像的重要特征,它反映了图像各个空间频率分量的强度大小.为了便于分析和直观地观察图像功率谱的变化规律,将计算的图像二维功率谱转换为一维功率谱曲线.以平移后的功率谱图中心作圆,圆的半径分别为图像的空间频率,形成一系列的环带,取环带中所有点的功率谱的平均值得到图像的一维功率谱曲线.低频分量对激光照明器的光强分布影响比较大.对于完全均匀的非相干光来讲,其频率谱为  $\delta$  函数即只包含直流分量,不含任何高频成分.激光照明器的功率谱越接近  $\delta$  函数,其照明效果越好.实际上频率太高的分量超出探测器的测量范围,并且高频分量所占的比重很少,对激光照明的均匀性影响非常小.低频分量对激光照明的均匀性影响非常大.将光强起伏功率谱曲线转换到对数坐标系下,并进行归一化处理,计算归一化后光强起伏功率谱曲线所围成的面积.采用归一化后光强起伏功率谱曲线所围成的面积衡量近红外激光照明的均匀性.

## 2 实验

对于普通照明灯具空间发光强度的测试通常采用分布式光度计. 由于激光照明照明距离远等特点限制, 普通的分布式光度计不能满足激光照明均匀性测试的要求. 在实际应用中, 通常采用功率计或 CCD 探测器法测试激光照明均匀性. 功率计法: 在靶面上划分区域, 用功率计测量每个区域中心的光强, 然后根据式(1)~(3)计算照明均匀性评价参量. 功率计法简单易操作, 但是容易受到取样点选取和间隔的影响. CCD 探测器法: 将待测激光光束照射到靶面上, 用 CCD 探测器拍摄靶面上的光强分布. CCD 探测器法可以获得待测光束在靶面上的光强分布, 测试的结果比较全面的反映照明激光的均匀性. CCD 探测器法取样密度大, 测量结果准确度高.

实验中用两个匀光方式不同的近红外激光照明器做对比(编号分别为 I、II 号激光照明器), 采用 CCD 探测器法拍摄近红外激光照明器的光强分布. 两个近红外激光照明器都采用相同的 808 nm 的 LD 激光器作为光源. I 号激光照明器中 LD 发出的光经过匀光片匀光, 通过胶合透镜变焦作为照明光(如图 1). II 号激光照明器中 LD 发出的光要先经过光纤传输到达匀光片, 然后通过胶合透镜, 最终作为照明光源(如图 2). 两个近红外激光照明器不同之处在于 II 号激光照明器的光要经过光纤传输, 其余器件都是相同. 由于光纤具有一定的匀光效果, 所以理论上 II 号近红外激光照明器的光强均匀性应该优于 I 号激光照明器. 通过调节胶合透镜的位置可以改变照明激光照明器的发散角. 拍摄不同发散角情况下近红外激光照明器的光强分布.

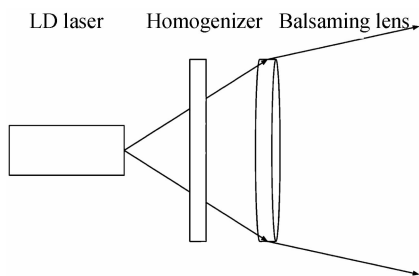


图 1 I 号激光照明器

Fig. 1 No. I near infrared laser illuminator

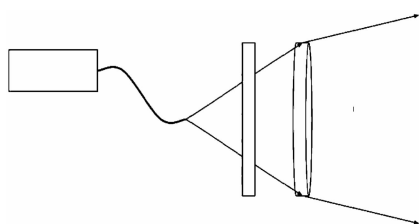


图 2 II 号激光照明器

Fig. 2 No. II near infrared laser illuminator

## 3 结果分析

从拍摄的光强分布图中, 每个激光照明器分别选取 2 幅在不同工作状态下典型的光强分布图进行处理(如图 3). 设置阈值光强, 选择有效的照明区域. 根据式(1~5)计算得到其照明均匀性评价参量(表 1, 调制度与对比度可以相互转换,  $M = (I - 1) / (I + 1)$ ), 因此表 1 中只列出调制度). 计算并画出四幅图像的功率谱曲线(图 4).

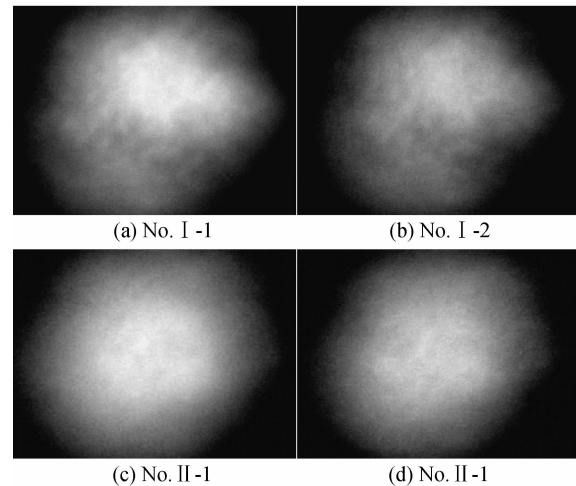


图 3 I 号和 II 号激光照明器的光强分布

Fig. 3 The laser intensity spatial distribution of No. I, II near infrared laser illuminators

表 1 四幅图像的传统评价参量

Table 1 The four image's usually evaluation parameters

Light intensity modulation image	factor/(%)	Fill factor(%)	Intensity variance	Flat-topped factor/(%)
I-1	50.306 7	63.085 8	17.783 3	64.125 0
I-2	46.075 1	64.459 4	14.117 3	65.368 1
II-1	41.422 6	81.777 9	11.439 2	82.634 0
II-2	42.968 7	81.694 3	12.300 6	82.520 6

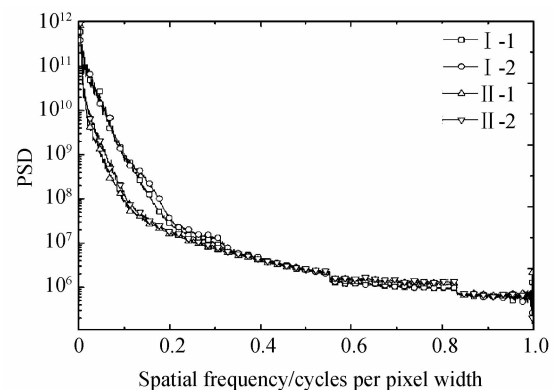


图 4 四幅光强图的功率谱

Fig. 4 PSD of the four image's intensity

通过传统的评价参量(表 1), 可以得出 II 号激光照明器的均匀性要优于 I 号激光照明器, 对于 I 号激光器, I-2 号光强图的照明均匀性要优于 I-1 号图像; 对于 II 号激光器, II-1 号光强图的照明均

均匀性优于 II-2 号图像,相同激光照明器在不同的发散角条件下,照明均匀性的差别不大.由光强的功率谱(图 4)得出光强均匀性越高其光强功率谱越低,证明光强功率谱可以很好的衡量激光照明的均匀性.将光强功率谱曲线转换到对数坐标系下,并进行归一化处理,计算归一化后光强功率谱曲线所围成的面积(图 5).

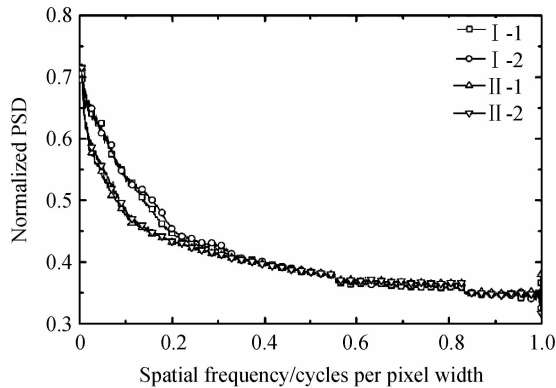


图 5 归一化后的光强起伏功率谱曲线

Fig. 5 PSD of the four image's intensity after normalized

激光照明的均匀性越好时,其光强功率谱越低,其所围成的面积就会越小.对于完全非相干的均匀光<sup>[11-12]</sup>,其功率谱曲线所围成的面积为 0.经过计算得到四幅光强图像归一化后光强功率谱曲线所围成的面积(表 2).

表 2 光强功率谱曲线围成的面积.

Table 2 The area surrounded by normalized PSD

Light intensity image	I-1	I-2	II-1	II-2
The area surrounded by normalized PSD	0.412 3	0.412 6	0.403 2	0.404 7

II 号激光照明器的照明均匀性要优于 I 号激光照明器,相同激光照明器的评价参量相差不大,同传统的评价参量相符合,验证了新参量的有效性.

## 4 结论

本文提出了采用图像数字处理的方法用近红外激光光强功率谱衡量照明近红外激光光强分布均匀性,为直观地评价近红外激光的照明均匀性采用归一化后光强功率谱所围成的面积作为衡量近红外激光照明均匀性的参量.通过对采用不同匀光方式的近红外激光器照明均匀性进行研究,证明了采用归一化后激光光强功率谱所围成的面积衡量近红外激光照明均匀性的有效性.激光照明的均匀性越高,那么激光光强功率谱就会比较低,其归一化后的光强功率谱所围成的面积就会越小.新的评价参量将光强信号转换到频域进行处理,有利于对光强信号进行空间滤波和降噪处理.采用归一化后激光光强功率谱所围成的面积衡量近红外激光照明均匀性对于

客观、全面地衡量近红外激光照明的均匀性具有重要意义.

## 参考文献

- [1] SUN Lu, WANG Jian-li, WANG Ming-hao, et al. Experiment and research on laser active illuminative imaging [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, **16**(9): 77-79. 孙露,王建立,王鸣浩,等.激光主动照明成像实验研究[J]. *光电与控制*, 2009, **16**(9): 77-79.
- [2] ZHANG Fa-quan, WANG Guo-fu, YE Jin-cai, et al. Lighting pattern of underwater optical monitoring system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1061-1065. 张法全,王国富,叶金才,等.水下光学监控系统照明方式的研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1061-1065.
- [3] ZHOU Sheng-guo, SHEN Xue-ju. Influence of optical element misalignment of beam spread collimation optical system on Gaussian beam propagation and transformation [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(2): 253-256, 266. 周胜国,沈学举.扩束准直光学系统中光学元件失调对高斯光束传输变换的影响分析[J]. *应用光学*, 2008, **29**(2): 253-256, 266.
- [4] LUO Xiao-xia, LIU Hua, LU Zhen-wu, et al. Automated optimization of free-form surface lens for LED collimation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1351-1355. 罗晓霞,刘华,卢振武,等.实现 LED 准直照明的优化设计[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1351-1355.
- [5] BELAND R. Propagation through atmospheric optical turbulence [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [6] LI Zeng-rong, LIU Ji-fang, DENG Zhong-fang, et al. Study of attenuation characteristic of ship wake's backward scattered light based on the detection of optical power [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1417-1420. 李增荣,刘继芳,邓仲芳,等.尾流后向散射光功率衰减特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1417-1420.
- [7] YANG Yu-lan, SUN Jin-xia, FU Guo-zhu, et al. Research on long-rang laser illuminated active imaging system [J]. *Journal of Changchun University Of Science And Technology*, 2009, **32**(1): 18-21. 杨玉兰,孙金霞,付国柱,等.长距离红外激光主动成像系统研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2009, **32**(1): 18-21.
- [8] LIU Wei-hui, WU Jian. Effect of mutiple Gaussian-Schell beams through strong turbulence on log-intensity variance [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, **26**(1): 25-28. 刘维慧,吴健.多高斯-谢尔光束通过强湍流对光强闪烁的影响[J]. *应用光学*, 2005, **26**(1): 25-28.
- [9] LI Hong-xia, LOU Qi-hong, YE Zhen-huan, et al. Research on evaluating norm of excimer laser beam uniformity [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2004, **16**(6): 729-732. 李红霞,楼祺洪,叶震寰,等.准分子激光光束均匀性的评价指标研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6): 729-732.
- [10] WELCH P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms [J]. *Audio and Electroacoustics, IEEE Transactions on*, 1967, **15**(2): 70-73.
- [11] WAN Min, ZHANG Wei, XIANG Ru-jian. Influence of laser spatial coherence on illumination uniformity [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2002, **14**(1): 41-44. 万敏,张卫,向汝建,等.激光空间相干性对照明均匀性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(1): 41-44.
- [12] HIGGS C, BARCLAY H, KANSKY J, et al. Adaptive-optics compensation using active illumination [A]. Washington: SPIE Press, 1998, **3381**: 47-56.