

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0293-04

空中目标激光照明的数值模拟*

叶一东 张卫 雒仲祥 彭勇 陈天江

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

提要 采用激光束主动照明技术,是对远距离暗目标进行成像、定位和跟踪的重要手段,由于大气湍流等原因,照明激光束到达靶上会出现光强空间分布不均匀,对成像质量和跟踪精度有较大影响。讨论了激光照明效果评价的主要参数,提出了采用照明光强起伏功率谱密度作为评价照明光强分布均匀性依据;在建立激光照明大气传输模型和计算方法基础上,在不同大气参数和光束数情况下对激光照明进行了数值模拟,得到了目标平面处照明光强起伏功率谱密度和目标图像,与实验得到的照明目标图像比较,验证了数值模拟结果的合理性。

关键词 激光照明, 大气湍流, 激光传输

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A

Numeric Simulation of Laser Illumination for Air Objects

YE Yi-dong ZHANG Wei LUO Zhong-xiang PENG Yong CHEN Tian-jiang

(Institute of Applied Electronics, Mianyang 621900)

Abstract Laser illumination is an effective technology for the imaging and tracking to the far dim objects in the air. The laser intensity spatial distribution on the target plane fluctuates usually remarkably, which will decrease image resolution and tracking accuracy in optical system. In this paper the parameters for evaluating illumination effect have been discussed, and power spectral density (PSD) of the illumination laser intensity fluctuation on the target plane is adopted to evaluate the intensity uniformity. A model of illumination laser propagating in atmosphere has been built, numeric simulation for laser illumination to air objects has been carried out and the illumination intensity fluctuant power spectral density and object image have been obtained. Being contrasted with experiment result shows that the simulation is reasonable.

Key words laser illumination, laser propagation in atmosphere, objects in air

在对空中远距离不发光目标进行成像探测和高精度定位跟踪的一些应用中,需要对远距离目标高分辨率成像。在夜间甚至白天,远距离不发光目标可能亮度太低,或者目标与背景之间的对比度很低,难以得到稳定可靠的高分辨率图像。为了克服自然条件的局限,激光照明技术日益受到广泛重视,用(一束或多束)激光对目标进行照明,使目标相对于背景有适当的亮度和对比度,从而实现目标的高分辨率成像和高精度定位、跟踪。目标的光学特性影响成像亮度和成像分辨能力。由于激光的相干性、单色性及大气湍流等因素,激光照明条件下目标的光学特性与自然光照条件下的光学特性有较大差别,主动照明条件下目标的光学特性与多种因素关系密切。

激光有很好的方向性和高亮度,不需要太高的平均功率(或脉冲能量)就可以使目标具有较高的亮度,并与背景之间有较大的反差,为空中目标的成像和跟踪创造了条件。但是,由于激光具有很好的单色性和相干性,经过大气湍流后照射到目标上的光强分布常常很不均匀(空间闪烁)。用什么参数定量地评价照明效果,以及多束照明技术在照明均匀性上有什么程度的作用,本文在分析照明效果参数基础上,试图用数值模拟方法探讨上述问题。

1 评价激光照明效果的基本参数

1.1 平均照度和亮度

目标表面照明区域内的平均辐照度(E)或辐射亮度(L)是评价激光照明效果的重要参数。结合照

* 中国工程物理研究院预研基金资助项目。

明系统和成像系统的相关参数,可以很容易地得到对激光器脉冲能量的要求。

1.2 对比度

照明目标相对于空间背景的对比度,对目标探测能力有很大影响。目标相对于背景的对比度定义为 $R_{\text{const}} = (L_{\text{target}} - L_{\text{bkg}}) / L_{\text{bkg}}$, 式中, L_{bkg} 是背景亮度, L_{target} 是目标亮度。在自然条件下,空中远距离不发光目标的成像对比度一般都较差。可见光和近红外波段,大气背景亮度主要来自大气对阳光或照明激光的散射。采用脉冲激光照明,结合窄带滤波和时间选通技术,可以显著提高目标背景对比度。

脉冲激光照明条件下,采用功率敏感成像技术,是提高目标背景对比度的另一可能手段。

1.3 均匀性

由于大气湍流导致激光束各部分之间的相干叠加,造成强度闪烁,影响了激光照明的光强分布均匀性。激光相对于自然照明的最主要缺点是照度均匀性不好,导致从目标图像难以得到准确的轮廓或亮度中心。激光照明技术亟需解决的关键问题就是提高照明均匀性。用什么参数来评价照明均匀性是一个需要研究的问题。

1.3.1 光强起伏方差

文献中大多采用目标上光强分布起伏方差来评价照明光强分布的均匀性:

$$\sigma = \sqrt{\sum_i (I_i / \bar{I} - 1)^2 / N}, \quad \bar{I} = \sum_i I_i / N \quad (1)$$

式中, I_i 是光斑中采样点 i 处的光强, N 是采样点数。光强起伏方差反映了光强的总的起伏强弱,但不能反映光强起伏空间尺度分布,而光强起伏空间尺

度与照明条件下的成像分辨率密切联系。

1.3.2 照明光强功率谱密度分布

在光强起伏方差相同的情况下,照明区域内的光强起伏空间尺度对照明效果有重要影响。如果光强起伏空间尺度小于成像系统的分辨尺度,或者远大于目标尺度,则对成像分辨率或目标定位精度可能没有明显影响。

因此,我们认为采用照明光强功率谱密度分布来评价目标照明光强均匀性,更为全面一些。对目标平面处的照明光强分布进行傅里叶变换可得照明光强起伏的空间功率谱密度分布:

$$P(f_x, f_y) = |\mathcal{F}[I(x_N, y_N)]|^2 \quad (2)$$

空间频率 f_x, f_y 单位可以取 m^{-1} ,也可折算到望远镜视场角取 mrad^{-1} 。均匀自然光照明条件下,可以近似认为正入射到目标方向上的光强分布处处均匀,其空间谱密度分布为 δ 函数,即只有零频,没有任何高频成分,因此在完全均匀的光照明条件下目标图像可以最好地反映目标表面反射率分布和轮廓结构。

2 空中目标激光照明的数值模拟

2.1 基本物理模型和计算方法

照明光束可用高斯光束或其他光束来模拟。激光束的较长距离 L 的大气传输可分为 N 层,各层厚度分别为 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$, 共有 $n + 1$ 个截面,在第 j ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 个截面处的复振幅表示为 $E_j(x_j, y_j)$ 。每一层的传输过程分别先在光场复振幅上迭加一个代表大气相位因子的相位屏:

$$\begin{cases} E'_j(x_j, y_j) = E_j(x_j, y_j) \exp[-i\Psi(x_j, y_j, d_{j+1})] \\ \Psi(x_j, y_j, d_{j+1}) = q \iint_{-\infty}^{\infty} g(f_x, f_y) F_\phi^{1/2}(f_x, f_y, d_{j+1}) \exp[i(f_x x_j + f_y y_j)] df_x df_y \\ F_\phi(f_x, f_y, d_{j+1}) = 2\pi k^2 \Phi_n(f_x, f_y) \int_0^{d_{j+1}} C_n^2(z) dz \end{cases} \quad (3)$$

式中, $C_n^2(z)$ 为大气湍流折射率结构常数, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, f_x, f_y 为空间频率, q 为定标常数, $g(f_x, f_y)$ 为高斯随机白噪声, $\Phi_n(f_x, f_y)$ 为折射率起伏谱密度函数,采用 Von Karman 折射率起伏谱密度模型。然后进行菲涅耳衍射传输:

$$E_{j+1}(x_{j+1}, y_{j+1}) = -\frac{i}{\lambda d_{j+1}} \exp\left[ik\left(d_{j+1} + \frac{x_{j+1}^2 + y_{j+1}^2}{2d_{j+1}}\right)\right] \mathcal{F}\left\{E'_j(x_j, y_j) \exp\left[\frac{ik(x_j^2 + y_j^2)}{2d_{j+1}}\right]\right\} \quad (4)$$

$\mathcal{F}\{\}$ 表示傅里叶变换,在傅里叶变换过程中的空间频谱坐标 $f_{x_{j+1}}, f_{y_{j+1}}$, 与空间坐标 x_{j+1}, y_{j+1} 间满足

$$f_{x_{j+1}} = \frac{x_{j+1}}{\lambda d_{j+1}}, \quad f_{y_{j+1}} = \frac{y_{j+1}}{\lambda d_{j+1}}$$

利用快速傅里叶变换,必须有足够多的采样点数,避免频谱混迭以达到足够高的计算精度。

照射到目标处的光强分布为:

$$I(x_N, y_N) = |E_N(x_N, y_N)|^2 \quad (5)$$

与目标反射率分布相乘,可得到目标亮度分布。再与探测系统的点扩展函数卷积可得目标图像。

2.2 数值模拟与结果分析

我们采用上述物理模型和计算方法,对激光照明进行了数值模拟。取照明光束为基模高斯光束,腰斑半径 $w = 6 \text{ cm}$, 波长 $0.53 \mu\text{m}$, 光束发散(半)角 1.2 mrad , 水平传输距离 $z = 2 \text{ km}$, 目标长度 2 m 。对多种不同大气湍流强度和光束数情况进行了数值模拟。图 1, 图 2 给出了部分典型结果。

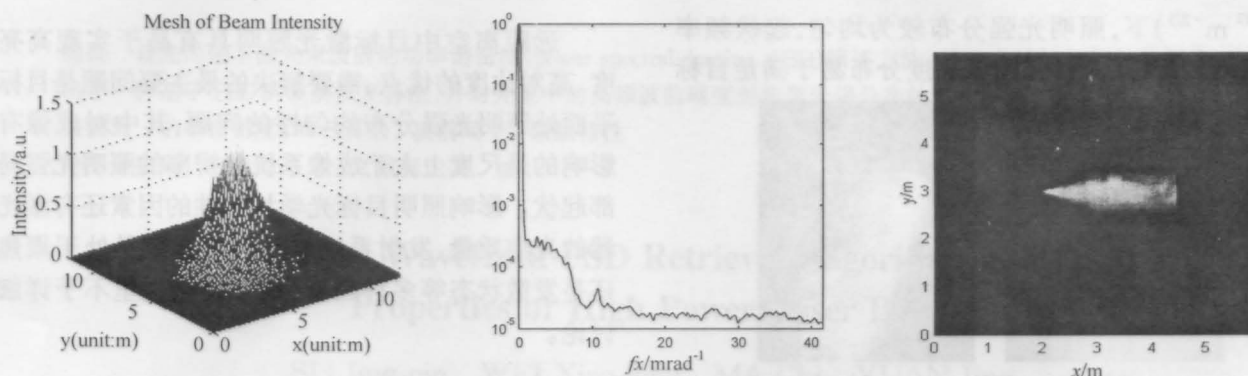


图 1 $C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 单束激光照明模拟结果。(a) 光强分布; (b) 光强起伏功率谱密度; (c) 目标图像

Fig. 1 Numeric simulation for single-beam laser illumination ($C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$). (a) Intensity profile; (b) PSD of intensity fluctuation; (c) object image

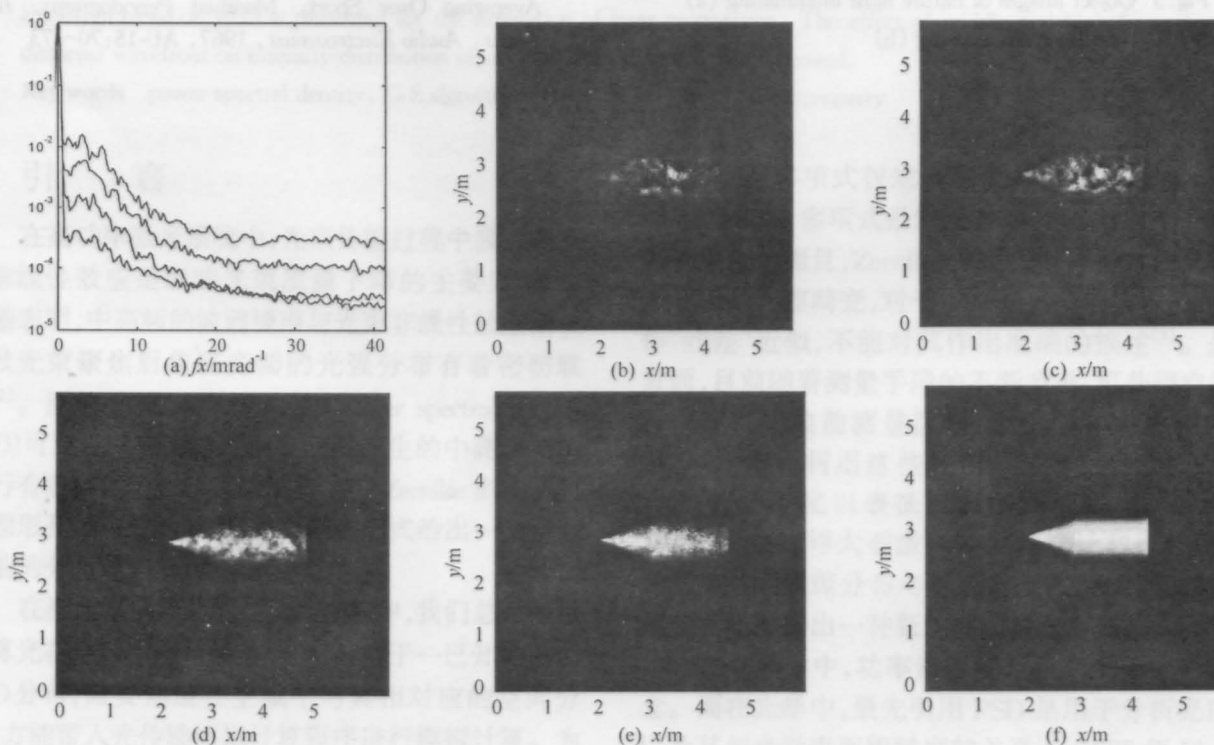


图 2 单束和多束激光照明对比的模拟结果($C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, 距离 2 km , 光束发散角 1.2 mrad)。 (a) 多束照明光强起伏功率谱密度(从上到下分别为 1、3、10、40 束); (b) 单束激光照明目标图像; (c) 3 束激光照明目标图像; (d) 10 束激光照明目标图像; (e) 40 束激光照明目标图像; (f) 理想均匀光束照明目标图像

Fig. 2 Comparing single-beam illumination imaging with multi-beam illumination image ($C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, distance 2 km , divergence angle of beam 1.2 mrad). (a) PSD of intensity fluctuation in multi-beam illumination (1, 3, 10, 40 beams from the top down); (b) Object image with single-beam illumination; (c) Object image with 3 beams illumination; (d) Illumination object image with 10 beams; (e) Illumination object image with 40 beams; (f) Illumination object image with uniform intensity light

图 1 中取大气折射率结构常数 C_n^2 取 $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 代表较弱的湍流,图 2 中 C_n^2 取 $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 代表较强的湍流,并取了 1 束、3 束、10 束、40 束激光照明。为了减小随机因素对光强起伏功率谱密度 (PSD) 分布的偶然影响,采用 Welch 方法^[1]进行了平均平滑化。

数值模拟结果表明,在弱湍流条件(如 $C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$)下,照明光强分布较为均匀,起伏频率和程度较低,此时目标图像亮度分布易于满足目标

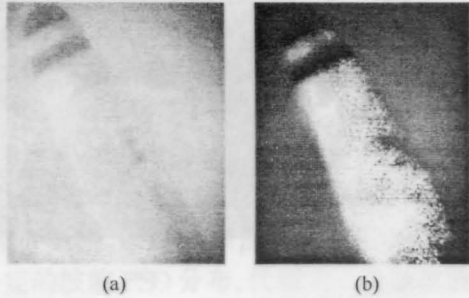


图 3 自然光照明(a)与激光照明(b)实验图像对比
(距离 550 m, 时间约 17:00)

Fig. 3 Object images of nature light illuminating (a)
and laser illuminating (b)

轮廓分辨要求;随着湍流强度的增加,强度起伏的频率和强度变大,目标轮廓分辨受到影响。在较强湍流情况下,多束照明可使照明光强变得更均匀,一定程度上提高目标图像质量。

图 3 给出了自然光照明和激光照明目标图像的实验结果,反映出照明光强分布均匀性方面的差别。

3 结束语

远距离空中目标激光照明具有易于实现高亮度、高对比度的优点,需要解决的最主要问题是目标平面处照明光强分布均匀性的问题,其中对成像有影响的是尺度上大于成像系统分辨率的照明光强局部起伏。影响照明目标光学均匀性的因素还有激光器的光束质量、发射系统以及照明光束是处于聚焦还是发散状态等多种因素,限于篇幅这里不予详细讨论。

参 考 文 献

- 1 P. D. Welch. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, 1967, AU-15: 70~73