

基于图像处理的激光远场光斑仿真方法*

许平¹, 张英远², 刘劲松¹

(1. 华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要:提出了一种基于图像处理的激光远场光斑仿真方法,通过对已有特定条件下的远场光斑图像进行处理,仿真出在各种条件下类似的光斑图像,并对这种方法进行了实现。然后分析指出了该方法不尽完善之处,并提出了解决的办法。

关键词:激光传输; 大气湍流; 光斑仿真

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)04-0423-04

Simulation method of far field laser spots based on image processing*

XU Ping¹, ZHANG Ying-yuan², LIU Jin-song¹

(1. State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Department of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A method based on image processing to simulate far field laser spots is put forward and realized, which simulates a lot of spots under various conditions by processing the far field spot image under some certain conditions. Something imperfect are analyzed and pointed out, and the corresponding solutions are provided.

Key words: Laser propagation; Turbulences; Spots simulation

0 引言

仿真是现代光电武器系统研制开发的重要一环,是提高武器系统性能、缩短研制周期、提高费效比的有效途径。用它来代替外场试验,不但可以节约大量人力、物力、财力,而且对于受季节、气候、天气等多种自然因素影响严重的光电对抗系统,它的结果可以更全面地衡量武器系统的性能。

激光作为新兴的高科技军事手段,在国防上占有特殊的地位。现代光电对抗武器如高能战略级激光武器系统、战术级激光武器系统等研制开发大都需要考虑到激光束的远距离传输。激光束在大气中远距离传输时,光束能量不仅会产生衰减,而且大气湍流对光束特性也会产生显著的影响。对于前者,仿真时主要进行激光束穿过大气后透过率的计算,这在一些文献^[1]中有较详细的论述。本文对激光束远距离传输时大气湍流所产生的效应进行了分析,基于各种

收稿日期:2003-11-02; 修订日期:2004-02-20

* 基金项目:国防预研基金支持项目(97J2.4.3DZ0104)

作者简介:许平(1978-),男,湖南湘潭市人,硕士,主要从事激光大气传输和光电图像处理方面的研究工作。

效应在图像上的直观表现,提出了一种对已有的实验结果进行图像处理的光斑仿真手段。

1 仿真处理

除了大气对光束能量的衰减,湍流对激光束也有比较复杂的影响。通常大气湍流对光束特性的改变包括很多方面,如光斑闪烁、抖动,光斑破碎,光束扩展等。本方法以这些效应在图像中的直观表现为依据,通过相关图像处理,达到由一幅特定条件下的光斑仿真出多幅不同条件下类似光斑的目的。

1.1 光斑破碎的仿真

光斑破碎是指激光束在湍流大气中传输一定距离后,会分成许多小单元的非涅耳区(见图 1),这些小单元的平均直径称为非涅耳尺寸 ρ_F ,它与激光的波长和传播距离有关^[2],可用下式估算:

$$\rho_F = \sqrt{\lambda z} \quad (1)$$

式中 λ 为波长; z 为光程。图 2 给出了 ρ_F 与光束传播距离之间的关系曲线。

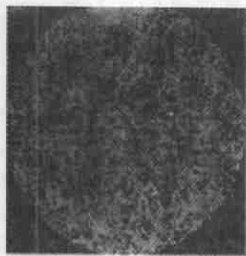


图 1 激光束传播 1.5 km 后的远场光斑图像

Fig. 1 Far field intensity image of a laser beam propagating 1.5 km through the atmosphere

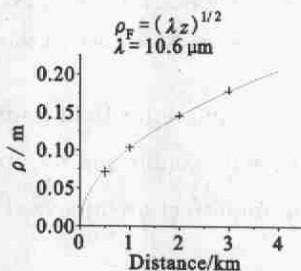


图 2 非涅耳尺寸与光束传播距离的关系

Fig. 2 Fresnel zone size as a function of the distance of beams propagation

仿真时,调用相同波长的光斑图像作为样本,按公式(1)分别计算样本和仿真需生成光斑的非涅耳尺寸,设其分别为 ρ_{F1} 、 ρ_{F2} ,则对样本进行比例 $M = \rho_{F2} / \rho_{F1}$ 的缩放,所得即为仿真图像。实际上,因为波长相同,根据公式(1),缩放比例有 $M = \sqrt{Z_2 / Z_1}$, Z_2 、 Z_1 分别为仿真图像和样本图像对应的传输距离。

1.2 光束扩展及光斑闪烁的处理

光束扩展是指光斑半径或面积的变化,有短期和长期光束扩展之分^[3]。一般来说,当激光束通过尺度

大于光束尺寸的湍涡传播时将发生偏折,而通过半径较小的湍涡时,将导致光束扩展,偏折作用较小。在非常短的时间内对光斑进行成像时,将会观察到小湍涡导致的半径为 α_S 的展宽光束斑点, α_S 就称为短期光束扩展。大尺度湍涡导致其束心偏离平均位置,由离轴半径 ρ_C 描述, ρ_C 实际上描述的就是束心漂移效应。

对于短期光束扩展 α_S ,有如下公式表述^[3]:

$$\langle \alpha_S^2 \rangle = \frac{z^2}{k_0^2 \alpha_0^2} + \alpha_0^2 \left(1 - \frac{z}{\mathcal{F}}\right)^2 + z^2 \theta_S^2 \quad (2)$$

经远距离传输后的激光,可以近似看成 $\mathcal{F} \approx z$,因此公式(2)可以表示为:

$$\langle \alpha_S^2 \rangle = \frac{z^2}{k_0^2 \alpha_0^2} + z^2 \theta_S^2 \quad (3)$$

式中 $k_0 = \omega_0 / C$, 为波数; z 为光程; \mathcal{F} 为波阵面曲率半径; α_0 为发射端激光束腰。

$$\theta_S = \begin{cases} 0.246 \alpha_0 / \rho_0 & \alpha_0 \leq 3\rho_0 \\ 0.575 \alpha_0 / \rho_0 [1 - 1.18(0.95 \alpha_0 / \rho_0)^{-1/3}] & \alpha_0 > 3\rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 ρ_0 为大气湍流相干长度,有:

$$\rho_0 = \left[1.46 \left(\frac{\omega_0}{C} \right)^2 z \int_0^1 (1 - \xi)^{5/3} C_n^2(z\xi) d\xi \right]^{-3/5} \quad (5)$$

$$\text{或} \quad \rho_0 = \left[1.46 \left(\frac{\omega_0}{C} \right)^2 z \int_0^1 C_n^2(z\xi) d\xi \right]^{-3/5} \quad (6)$$

公式(5)和(6)分别适用于球面波和平面波。式中 C_n^2 为大气折射率结构常数,是大气光学基本参数之一,也是湍流强度的重要评价参数, C_n^2 越小,则湍流越弱, C_n^2 随地理位置、高度、气象条件、季节和昼夜等条件的不同变化很大。

在已知传输距离 z 和发射端激光束腰 α_0 以及大气折射率结构常数 C_n^2 时,可以由上式计算得到短期扩束后的光斑半径 α_S 。例如当垂直高度为 1000 m,光束传输的天顶角为 30° 时, $z = 1154.7$ m,取 $\alpha_0 = 10$ mm, $C_n^2 = 1.4 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-2/3}$,计算得 $\alpha_S \approx 3.49$ m。计算结果表明:当出射束腰为厘米量级时,经过数公里传输的激光束远场光斑尺寸将达到米的量级。这显然是超出各种探测器成像面尺寸的。因此在仿真光斑图像时通常可认为光斑布满了整个成像面。在已知要生成仿真光斑图像的大小时,用前面经过缩放的样本图像进行填充即可。

对于束心漂移,作为一种动态效应,不仅要考虑束心偏离平均位置的离轴半径 ρ_C ,还要考虑漂移的频率。

在弱起伏区,光谱描述取 Kolmogorov 功率谱,束心漂移 ρ_c 在几何光学上有一个简单的解析表述^[4]:

$$\langle \rho_c^2 \rangle = 0.97 C_n^2 \alpha_0^{-1/3} z^3 \quad (7)$$

或 $\langle \rho_c^2 \rangle = 1.10 C_n^2 \alpha_0^{-1/3} z^3 \quad (8)$

公式(7)和(8)分别适用于准直和会聚光束。与实验结果比较表明,当孔径大于菲涅耳区大小及其平方与相干长度的比值时,上述的计算结果是有效的。

与短期扩束类似,束心漂移的尺度也远大于成像面的尺度,因此漂移在图像上主要表现为按一定频率的光斑变化,从一个稳定的光斑图样变化为另一个稳定的光斑图样,而光斑漂移出图像区域的可能性很小。光束漂移的频率较低,主要在 0.1~10 Hz 范围内,其基本频率可用下式估算^[5]:

$$f_0 = \sqrt{2} v_{\perp} / 2\pi D(\xi z) \quad (9)$$

式中 v_{\perp} 是与光束传输方向垂直的横向风速; $D(\xi z)$ 为像面光束直径。按此频率变化的光斑可以采用随机填充的方法实现,即填充时每次在样本图像中随机取一小块区域进行填充,最后生成的整块仿真光斑图样也将是随机的。以频率 f_0 进行填充,每次随机生成的光斑图样不同,表现了光斑的变化。

光斑的闪烁是指在湍流大气中与光源相距 z 处测量光强时,会出现光强 I 随时间围绕平均值 $\langle I \rangle$ 做随机起伏的现象。它与束心漂移一样,也是一种动态效应,在图像上也体现为光斑图样从一个稳态变化到另一个稳态。

在洁净湍流大气传输的情况下,光斑闪烁的频谱宽度为 $(\lambda z)^{-1/2}$ 量级,典型值大约为 10~100 Hz。一些有关光斑闪烁的实验结果的分析表明^[5],在 1.5 km 的距离内,当折射率结构常数 $C_n^2 \leq 10^{-13} \text{ cm}^{-2/3}$ 时,大气准一致态出现 3~15 次/s,此时光斑较稳定,持续时间为 2~4 ms。因此对它的处理同样可以按上面的方法以闪烁对应的频率进行。

1.3 光斑灰度值的处理

仿真中光斑的灰度值反映了光斑的强度,但同时取决于成像器件的特性。同样的功率密度对于不同灵敏度的成像器件灰度值也不同。设成像器件起始响应阈值对应的功率密度为 ρ_1 ,饱和阈值对应的功率密度为 ρ_2 ,则对应功率密度为 ρ_p 的光斑,灰度值 g 可以由下式计算:

$$g = \frac{\rho_p - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} 255 \quad (10)$$

已知光束出射功率 P_{out} 和大气传输透过率 t ,光斑的功率密度可以表示为:

$$\rho_p = \frac{P_{out} t}{\pi \alpha_s^2} \quad (11)$$

仿真时对样本图像进行灰度调整。对应一副样本光斑图像,首先应从直方图中统计出两个特征灰度值 Max 和 Min ,分别代表破碎的光斑图像中明亮处和破碎处的灰度值(Min 实际代表大气背景辐射,通常不为 0)。由公式(10)计算得到的 g 对应的应为光斑明亮处的灰度值。因此应将样本图像中灰度值为 Max 的点的灰度值调整到 $Min + g$,并对样本图像中灰度值高于 Min 的各点做如下调整:

$$g_{new} = Min + \frac{g_{old} - Min}{Max - Min} g \quad (12)$$

式中 g_{old}, g_{new} 分别为样本图像和仿真处理后图像对应的灰度值。当 $g_{new} \leq 0$ 时,按 g_{new} 处理, $g_{new} \geq 255$ 时,按 $g_{new} = 255$ 处理。如此调整后的仿真光斑将能较好地反映出光斑强度的变化。

2 图像仿真处理示例

2.1 缩放处理菲涅耳尺寸的变化

将激光束传输 1.5 km 光斑图像作为样本图像,利用上述方法仿真激光束传输 1 km 时的光斑图像,如图 3 所示。



图3 激光束传播 1.5 km 后的光斑图像(源图)
Fig. 3 Spot image of a laser beam propagating 1.5 km through the atmosphere (source image)



图4 缩放后的光斑图像
Fig. 4 Spot image of the laser beam zoomed from the source image

2.2 随机填充生成图像显示光斑稳态的变化

设需要生成图像的大小(即成像面大小)为 128

$\times 128$,以完成缩放后的图4作为样本进行多次填充,随机生成的各幅不同光斑图像表示光斑的各个稳态。

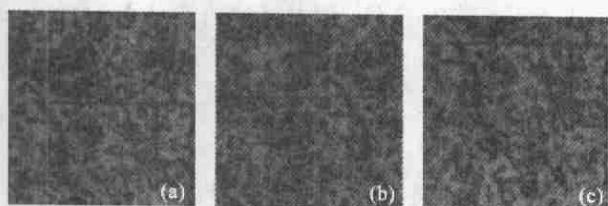


图5 随机填充生成的多幅光斑图像

Fig. 5 Spot image of the laser beam generated by random stuffing

2.3 灰度调整反映光斑强度的变化

设激光束的出射功率为6000 W,传输1 km后的大气透过率为0.85,激光出射的束腰为10 mm,高空大气风速为30 m/s,大气折射率结构常数 C_n^2 取 $1.4 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$,大气湍流相干长度 $\rho_0 = 5.84062 \text{ m}$,大气短期扩束后的光斑半径 $\alpha_S = 0.453719 \text{ m}$,光斑的功率密度 $\rho_p = 0.788582 \text{ W/cm}^2$ 。

设成像器件起始响应阈值对应的功率密度 $\rho_1 = 0.5 \text{ mW/cm}^2$,饱和阈值对应的功率密度 $\rho_2 = 2 \text{ W/cm}^2$,由公式(10)计算得 ρ_p 对应的灰度值 $g = 100$ 。取上面经缩放和随机填充生成的各幅图像为样本图像,根据直方图分别取 $Max = 140, Min = 90$,然后按公式(12)进行灰度调整,得到如图6所示的各幅图像。

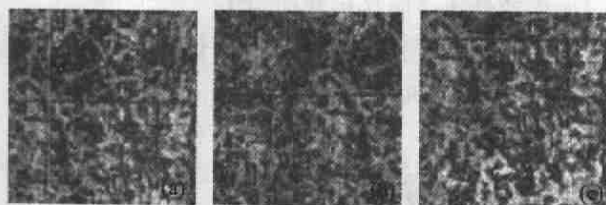


图6 灰度调整后生成的多幅光斑图像

Fig. 6 Spot image of the laser beam after adjusting the grey

图6是最终生成的1 km处光斑图像。它虽然以图5作为样本图像,但事实上只是利用了它的光斑图样以及各点的灰度值关系,图6的灰度值实际是由给定的有关参数经计算决定的。因此如果调整某些成像器件参数或者激光出射功率等参数,生成的光斑图像灰度值有可能比原始的1.5 km处的光斑图像要低。

3 结束语

激光束通过大气进行远距离传输时,除了大气的

衰减效应,大气湍流对光斑成像也将产生严重影响。对激光束远距离传输的光斑进行仿真有两条思路:一条是建立一个大气模型,然后从光路传输的基本理论出发,计算出经过这个大气模型传输一定距离后成像面上的光场分布。由于随机光波场的数学处理和相干性变化规律等的复杂性,使得大气湍流至今仍是理论研究的一项重大难题,因而沿这条思路进行仿真也就显得非常困难,而理论结果与实验测量往往也相差甚远。为了克服这种理论上的局限性,本文提出第二条仿真思路。从实验结果中采集各种条件下的远距离传输光斑图像作为样本,以大气湍流效应在图像上的直观表现为依据进行图像处理,进而仿真出多幅不同条件下类似光斑图像。

这种基于图像的仿真方法样本图像直接来源于实验结果,仿真中也与样本图像保持了较好的相关性,因此是一种绕开理论障碍,较为实际的解决方法。它可以仿真在各种光电对抗条件下激光远场光斑的分布,结合相关的评估系统就可以分析相关的光电对抗武器系统的效能。它的不足之处在于由于完全采用基于图像的方法,因此不可避免地受到一些图像处理上的局限性,比如对原始图像放大过多时,图像的细节就得不到保证等。因此一幅样本图像只能在生成与它的传输距离相差不多的范围内的光斑时有用。为了克服这些不足,可以将实验结果中采集的各种条件下的光斑图像组建成图像数据库,通过不断丰富数据库中的样本来解决。

参考文献:

- [1] 彭德权,周成平,丁明跃. 海空背景长波红外大气透过率的仿真计算方法[J]. 红外与激光工程,2001,30(2):112-117.
- [2] 李田泽. 大气湍流对激光束传输的影响讨论[J]. 应用光学,1997,18(3):30-32.
- [3] 张逸新,迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京:国防工业出版社,1997. 83-98,110-112,146-148.
- [4] James H Churnside, Richard J Latatis. Wander of an optical beam in the turbulent atmosphere[J]. Appl Opt,1990,29(7):926-930.
- [5] Borodin V G, Vakhmyanin K P, Il' V V in, et al. Temporal variations of the structure of a laser beam in the surface layer of the atmosphere[J]. Opt Technol,1999,66(11):968-969.