

扩展物体漫反射光传输及成像的 数值模拟研究

王英俭 吴 毅

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 国家高技术大气光学重点实验室, 合肥 230031)

摘 要 对扩展漫反射体的成像进行了数值模拟研究。利用近轴近似标量波动方程及其分步相屏算法, 对漫反射体反射的相对于接收孔径光轴的近轴光传输及其成像进行了数值模拟计算分析, 结果表明该模拟算法是可行的, 也对图像传输的湍流效应进行了初步计算和讨论。

关键词 大气传输, 漫反射, 数值模拟。

1 引 言

扩展物体反射光大气传输湍流效应研究是图像大气传输非常关注的重要问题之一。一般反射物体是漫反射或部分漫反射体即其反射光是非相干光或部分相干光。非相干光或部分相干光传输的数值模拟计算有着明显的困难, 即其发射角非常大, 若不采取正确有效的计算方法, 有限的数值计算网格是远达不到合理的计算精度的。然而, 所关心的往往仅是接收孔径范围内的光束信息, 因此, 如果能在接收孔径内得到精确的光波数值结果, 就能够对所关心的一些问题进行研究。对于漫反射体反射的相对于接收孔径光轴的近轴光的传输, 可以利用近轴近似标量波动方程及其分步相屏算法进行数值模拟计算。本文的计算结果表明该方法是可行的, 从而为扩展目标反射光大气传输及其成像等问题的研究提供了一个有效手段。

2 计算方法

数值模拟计算是对激光大气传输湍流效应、非线性热晕效应及其自适应光学相位补偿进行定量研究的重要手段^[1, 2]。激光大气传输满足近轴近似标量波动方程, 即

$$2ik \frac{\partial}{\partial z} u(\mathbf{r}, z) + \Delta u(\mathbf{r}, z) + k^2 \left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) u(\mathbf{r}, z) + ik\alpha(z) u(\mathbf{r}, z) = 0 \quad (1)$$

其中, $u(\mathbf{r})$ 为光波函数, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长; $n(\mathbf{r}, z) = n_0 + n_1$ 为大气折射率, n_0 为未受扰动的大气折射率, n_1 为大气折射率扰动量, $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$, α 为大气消光系数, z 轴表示光束传输方向。(1) 式的数值计算一般均采用分步相屏算法, 即将光束传输分成若干步, 对于每一步($z \sim z + dz$) 的传输计算分为三步, 如图 1 所示。第一、第三步忽略(1) 式中的拉普拉斯算符项, 即分别计算 $z \sim z + dz/2$ 和 $z + dz/2 \sim z + dz$ 大气引起的光束相位

起伏；第二步计算 $z \sim z + dz$ 的真空传输。该计算方法精度高，速率快，已广泛应用于激光大气传输数值模拟计算。

事实上，漫反射体或部分漫反射体反射的非相干或部分相干光的传输是不满足近轴近似方程(1)的。在激光照明物体，利用其漫反射光或部分漫反射光成像或作为自适应光学系统的信标时，仅关心接收孔径内的光波信息。在较小的传输距离 dz 内，接收系统光轴的近轴光传输可由(1)式描述，这样仍可采用上述相屏算法。由于漫反射或部分漫反射光发散角很大，传输一定距离后光束扩展将超过计算网格。在数值计算中，对于每一步传输(如 z 到 $z + dz$) 计算后，将超过计算网络缓冲区的光场置为零，即仅保留计算网络缓冲区内的光场，再进行下一步的传输计算。该方法相当于仅计算近轴光束的传输，并忽略了非旁轴光经多次散射再进入接收孔径的影响。

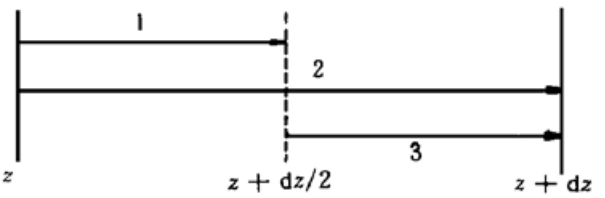


Fig. 1 Scheme of the light propagation algorithm

3 结果讨论

考察如图 2(a) 所示 H 形反射体对相干照明光的反射光传输及成像。反射物体对相干照明光的漫反射，采用在光场上施加高斯随机振幅和相位调制的方法进行模拟。在本文的模拟计算中，高斯随机相位调制的方差为 $(2\pi)^2$ ，振幅反射率设为均匀的。

图 2(b) 所示为利用上述算法得到的 H 形物体漫反射光在真空中传输并成像到像面上的计算结果。考虑到物体的随机相位调制，图中像强度为 10 次传输计算结果的平均。具体计算参数如下：照明激光波长为 $0.82 \mu\text{m}$ ，反射体高 $h = 0.6 \text{ m}$ ，宽 0.45 m ，H 形物体两竖条宽度及中间间隔[如图 2(a)] $d = 0.15 \text{ m}$ ；传输距离 L 为 10.0 km ，成像系统的接收口径 D 为 0.3 m ，横向计算网格为 256×256 ，横向抽样间隔为 $\Delta x = \Delta y = 0.004 \text{ m}$ ，传输步长为 500.0 m 。由图 2(b) 可以看到，计算得到了与实际物体一致的图像，这表明上述计算方法是可靠的。图中像强度的起伏是平均次数有限的缘故。为了比较，图 3 给出了 H 形物体镜面反射光传输以及利用不同接收口径成像的计算结果，计算参数同图 2。由图 3 可以看到，当接收口径比物体小时，相干反射光所成的像是物体的局部，而且由于衍射作用产生明显的条纹。

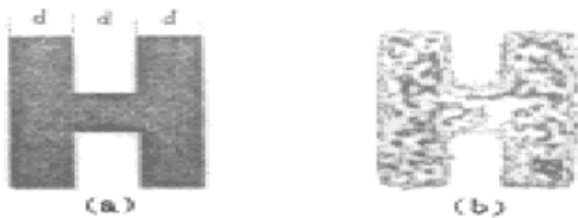


Fig. 2 Scheme of the object (a) and the calculated result of the image of the diffuse reflection object (b). Calculation parameters: $h = 0.6 \text{ m}$, $d = 0.15 \text{ m}$, $L = 10 \text{ km}$, $D = 0.3 \text{ m}$, $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$

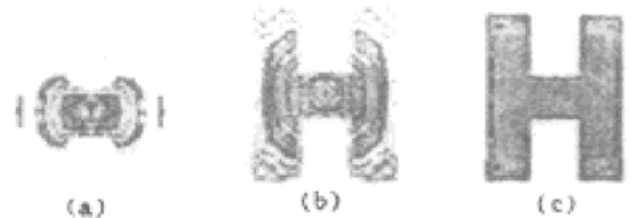


Fig. 3 The calculated result of the image of the mirror reflection object shown in Fig. 2 (a) at different receiving diameters. (a) $D = 0.3 \text{ m}$, (b) $D = 0.6 \text{ m}$, (c) $D = 0.85 \text{ m}$. Calculation parameters: $h = 0.6 \text{ m}$, $d = 0.15 \text{ m}$, $L = 10 \text{ km}$, $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$.

利用上述计算方法，初步计算了大气湍流对图像传输质量的影响。湍流效应采用湍流相位屏谱反演算法进行模拟^[3]，湍流强度用大气湍流横向相干长度(Fried 相干长度) r_0 表示。

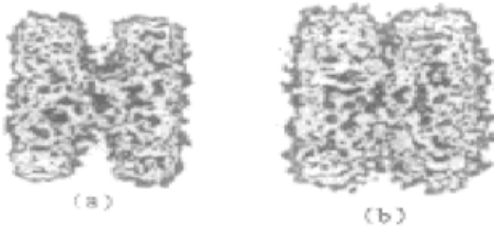


Fig. 4 The calculated result of the image of the diffuse reflection object shown in Fig. 2(a) at the different turbulence coherent length. Calculation parameters: $h = 0.6 \text{ m}$, $d = 0.15 \text{ m}$, $L = 10 \text{ km}$, $D = 0.3 \text{ m}$, $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$. (a) $r_0 = 8.14 \text{ cm}$, (b) $r_0 = 4.07 \text{ cm}$

图 4 所示为不同湍流强度对图像质量影响的计算结果, 图中像强度同样为 10 次传输计算结果的平均。除湍流参数外其它计算参数同图 2。由图 4 可以看到, 湍流强度越强即大气湍流横向相干长度 r_0 越小, 对图像质量的影响就越大, 即像质越差。当大气湍流横向相干长度为 4.07 cm 时, 该 H 形物体的形状几乎不可分辨。这是因为, 当大气湍流横向相干长度 r_0 小于成像系统接收口径 D 时, 系统的分辨率决定于 r_0 。利用上述计算参数, 可以得到当 r_0 等于 4.07 cm 时系统的可分辨率最小尺度约为 0.24 m 。而该 H 形物体两竖条宽度及其中间间隔 d 为 0.15 m , 因此不能被分辨。而在 $r_0 = 8.14 \text{ cm}$ 时, 系统的可分辨最小尺度为 0.12 m , 因此该 H 形反射体还是可分辨的。

由以上计算结果可以看到, 对于漫反射体反射的相对于接收孔径光轴的近轴光的传输, 可以利用近轴近似标量波动方程及其分步相屏算法进行数值模拟计算。在利用该算法对图像传输湍流效应进行计算分析时, 相当于忽略了非旁轴光经多次散射再次进入接收孔径的影响。一般情况下, 计算网格宽度大于反射体尺寸, 更大于接收孔径, 因此上述近似是合理的。

参 考 文 献

- [1] F. G. Gebhardt, Twenty-five years of thermal blooming: An overview. *Proc. SPIE*, 1990, **1221**: 2~25
- [2] 王英俭, 激光大气传输及其相位补偿若干问题研究. 博士论文, 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 1996
- [3] 王英俭, 吴毅, 折迭式 FFT 算法对激光大气传输湍流效应的数值模拟. *强激光与粒子束*, 1992, **4** (4): 581~587

Numerical Simulation of Propagation of Diffuse Reflection Light of Extended Object

Wang Yingjian Wu Yi

(Key Lab. of Atmospheric Optics of National High Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

(Received 8 September 1997; revised 17 November 1997)

Abstract The propagation of diffuse reflection light of an extended object is numerically simulated. It is shown that propagation and imaging of the paraxial diffuse reflecting light near optical axis of the receiving telescope can be calculated by the paraxial scalar wave equation and phase screen algorithm. The turbulent effects on the image propagation are calculated and discussed.

Key words atmospheric propagation, diffuse reflection, numerical simulation.