

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0499-04

湍流大气激光传输数值模拟

周文明, 徐 军, 张清华, 翁晓东, 李 俊
(第二炮兵工程学院物理教研室, 陕西 西安 710025)

摘要 介绍了大气湍流的统计特性、基本模型。利用 SVS-Fortran 的 Ran(I)产生的随机数序列作为随机变量, 客观地描述实际大气湍流的随机过程, 经快速傅里叶变换和滤波建立了替代水平湍流大气的等效模型, 并根据大气折射率功率密度谱的卡尔曼谱模型, 采用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分算法, 通过快速傅里叶变换(FFT)和逆变换(IFFT)实现激光的湍流大气传输过程的模拟。结果表明, 随机相位屏产生的附加相位反映了大气结构参数的性能, 验证了模型的正确性。

关键词 激光传播; 大气湍流; 数值模拟

中图分类号 TN012

文献标识码 A

Numeric Simulation of Laser Propagation in Atmospheric Turbulence

ZHOU Wen-ming, XU Jun, ZHANG Qing-hua, WENG Xiao-dong, LI Jun
(Physics Department, The Second Artillery Engineering College, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract Statistical characteristics and basic model of atmospheric turbulence are reported. Using random number sequence generated by randomizer of SVS-Fortran as random variable, random process of atmospheric turbulence is objectively described. A equivalent model of horizontal atmospheric turbulence is constructed through FFT and filtering. Basing on Karman spectra model of atmospheric index-of-refraction power spectra density and the Generalized Huygens-Fresnel diffraction integral theory, the process of laser propagation in atmospheric turbulence is simulated with an efficient two-dimensional FFT and IFFT by computer. It is shown that additory phase generated by random phase screens reflected characteristic parameter of structure of atmospheric turbulence.

Key words laser propagation; atmospheric turbulence; numeric simulation

1 引言

激光大气传输过程中, 因受大气湍流的影响, 相位发生畸变、强度起伏、能量衰减并重新分布, 光束质量严重下降。大气湍流引起的大气折射指数的随机起伏, 将严重影响激光光束在大气中的传输特征。本文建立了替代水平湍流大气的模型, 近似进行了光束的传输模拟。

2 激光大气传输概述

2.1 湍流的基本模型^[1]

总体上大气湍流是非各向同性的, 但在给定的小区域内可近似看成是均匀和各向同性的, 大气折射率分布满足大气折射率结构函数 $D(r)$ 的“2/3 定律”

$$D_n(r) = C_n^2 r^{2/3} \quad (l_0 \ll r \ll L_0) \quad (1)$$

式中, r 为统计湍流特性两点间距离, l_0, L_0 分别为湍流内尺度和外尺度。 C_n^2 是大气折射率结构常数, C_n^2 越小, 则湍流越弱, C_n^2 一般在 $10^{-16} \sim 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 之间。

除了结构函数外, 方差和功率谱也是分析随机介质的有效方式。Kolmogorov 谱认为在 Kolmogorov 惯性区, 湍流的外尺度 L_0 无限大, 但实际 L_0 要小得多, 因而常使用较合理的卡尔曼(Karman)谱^[2]:

$$\phi_n(k^2) = 0.033 C_n^2 [k^2 + (2\pi/L_0)^2]^{-11/6} \quad (2)$$

2.2 广义惠更斯-菲涅耳原理及衍射积分

利用积分方程(广义惠更斯-菲涅耳原理)来近似求解湍流介质中的波传播方程^[4]。如图 1 所示。光波在通过任何形式的光阑后, 像面上的光斑分布可用光阑上的各个子波光源叠加。通过在惠更斯-菲涅耳积分核中引入一随机相位项替代湍流, 从而产生一种广义惠更斯-菲涅耳原理。并对相位扰动采

作者简介: 周文明(1970-), 男, 第二炮兵工程学院硕士研究生, 主要从事激光传输及应用方面的研究工作。

E-mail: zhouwenming7012@sohu.com

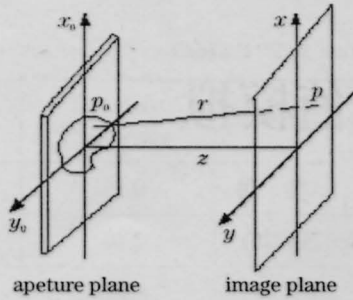


图 1 广义惠更斯-菲涅耳原理图

Fig.1 Schematic of extended Huygens-Fresnel principle

用 Rytov 近似得到广义惠更斯-菲涅耳积分为:

$$E(x,y) = \left(-\frac{i}{\lambda}\right) \iint E(x_0,y_0) \frac{\exp(ikz)(1+\cos\theta)}{2z} dx_0 dy_0$$

(3)

其中, z 是光阑到像屏的距离, θ 是光阑面上点 (x_0, y_0) 处法线和矢量 PP_0 的夹角, $E(x_0, y_0)$ 是包含附加相位扰动的源复振幅。可得到衍射计算公式。

夫琅和费衍射近似公式[近似条件 $z \gg \frac{\pi}{\lambda}(x_0^2 + y_0^2)$]:

$$E(x,y) = -\frac{i}{\lambda z} \exp\left[ik\left(z + \frac{x^2 + y^2}{2z}\right)\right] \times \iint \Sigma' A(x_0, y_0) \exp\left[-i\frac{k}{z}(xx_0 + yy_0)\right] dx_0 dy_0 \quad (4)$$

式中 (x_0, y_0) 是光阑面上的坐标, (x, y) 是观察屏上的坐标, z 是传输距离, $A(x_0, y_0)$ 是光波刚离开光阑时的复振幅。

2.3 衍射的傅里叶变换

在数值模拟中, 令 $f_{x_0} = x_0/\lambda z, f_{y_0} = y_0/\lambda z$, (4)式变为:

$$E(x,y) = -\frac{i}{\lambda z} \exp\left[ik\left(z + \frac{x^2 + y^2}{2z}\right)\right] \times \iint \Sigma' A(x_0, y_0) \exp[-i2\pi(f_{x_0}x_0 + f_{y_0}y_0)] dx_0 dy_0 \quad (5)$$

可见, 只要得到 $A(x_0, y_0) \exp[(ik/2z) \cdot (x_0^2 + y_0^2)]$ 和 $A(x_0, y_0)$ 的傅里叶变换就可以得到菲涅耳衍射图和夫琅和费衍射图形。

2.4 空间频率域中的衍射积分

对 $E(x, y)$ 和 $E(x_0, y_0)$ 作傅里叶变换得 $G(f_x, f_y)$ 和 $G(f_{x_0}, f_{y_0})$, 则频域空间的传递函数为:

$$G(f_x, f_y) = G(f_{x_0}, f_{y_0}) \exp\left[i\frac{2\pi z}{\lambda} [1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2]^{1/2}\right] \quad (6)$$

利用此式可实现频域中光束传输变换^[5]。

3 湍流传输模型的建立

3.1 随机数的产生

模拟湍流的随机扰动, 这里采用 SVS-Fortran 的 GaussRand(·) 随机数发生器产生的随机数序列作为随机变量。根据测试该随机数具有均匀性、再现性、最小的存储单元、快速、不重复性和统计独立性, 能客观地描述大气湍流的随机过程。

3.2 相位屏的建立

相位屏是用来替代激光束传输路径上的随机湍流, 是整个模型核心。相位屏由随机数发生器产生, 它形成一个 $L \times L$ 具有正态分布的实数矩阵, 经傅里叶变换转换到频率空间, 滤波后进行傅里叶逆变换。这里只考虑对光束相位产生影响。

3.3 激光湍流传输及程序框图

高斯相位屏需经过湍流特征调制才具有所模拟的光路上传输介质的性质。(2)式给出了功率谱和折射率结构常数 C_n^2 之间的关系, 这里的滤波函数为:

$$\phi_0(k) = 2\pi k^2 \delta_x \phi_n \quad (7)$$

式中 δ_x 是相位屏的厚度, ϕ_n 由(2)式给出。相位屏的每个谱成分乘以方程(5)的平方根, 实现对通过相位屏的初始光波产生影响。激光传输程序流程见图 2。

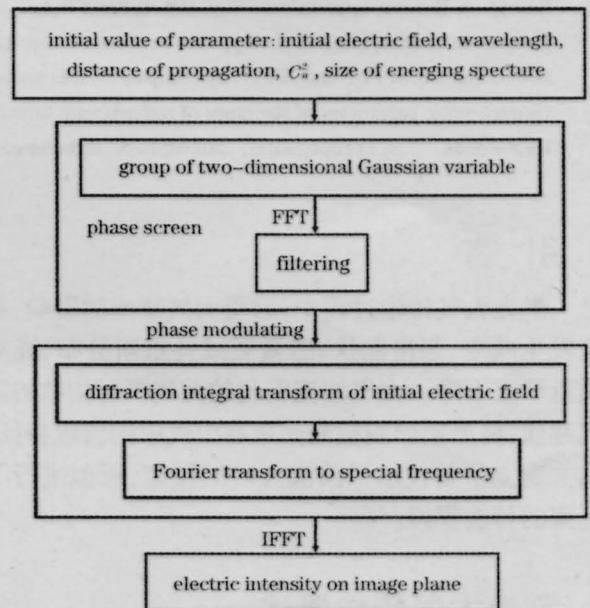


图 2 激光水平大气传输模拟流程图
Fig.2 Simulation flow chart of laser beam horizontal atmospheric propagation

4 模型的检验

下面通过已知特性的高斯光束的湍流大气传输

来检测模型正确性和可靠性。

4.1 高斯光束^[7]的真空传输

高斯光束的传输特性:空间不变性和像面上强

度分布保持高斯分布,如图3。

结果表明,程序在没有附加相位屏的真空传输过程是正确的。

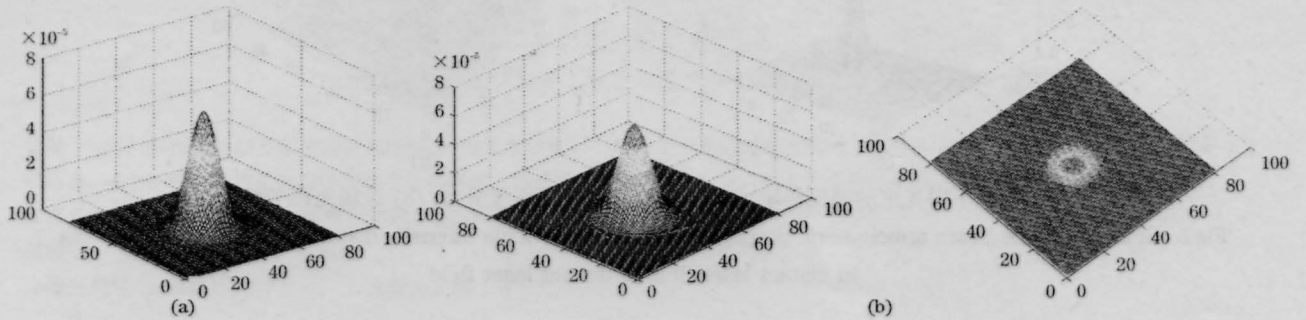


图3 (a) 初始高斯光束; (b) 传输后的高斯强度分布

Fig.3 (a) Initial Gaussian beam; (b) distribution of Gaussian electric intensity after propagation

4.2 随机相位屏检测

相位屏是用来模拟光束传输路径上的湍流大气介质,它产生的附加相位不仅能反映大气结构参量性能,又要有一定的随机性,图4是相同和不相同大气折射率结构常数的随机相位屏。

可见,不同大气折射率结构常数 C_n^2 产生不同幅值的高斯相位屏。

4.3 光束在随机介质中的传输

下面是激光在湍流大气中传输的整体检测。图5和图6是不同传输距离的高斯光束湍流大气传输的结果。计算条件:湍流外尺度: $L_0=15\text{m}$;大气折射率结构常数: $C_n^2=10^{-16}$;发射孔径: $D=0.5\text{ m}$; $\lambda=632.8\text{ nm}$ 。

从图中可见,传输距离对单束光远场光斑的大小表现出明显差别。

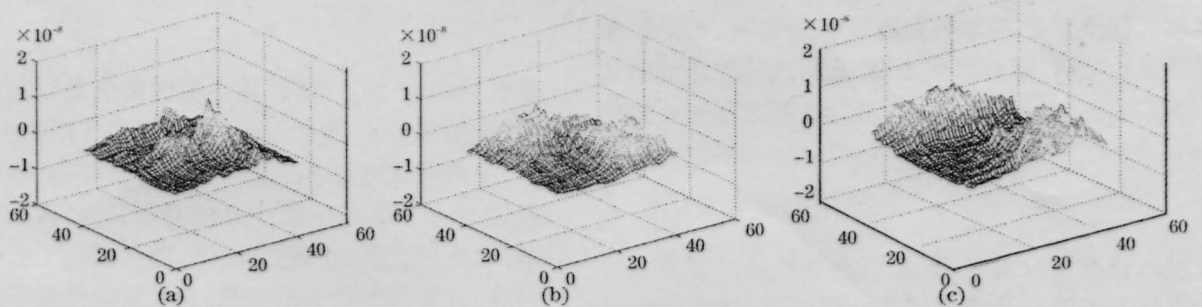


图4 (a) $C_n^2=1 \times 10^{-15}$, $PV=24.833$ 时的相位屏; (b) $C_n^2=1 \times 10^{-15}$, $PV=27.013$ 时的相位屏; (c) $C_n^2=1 \times 10^{-17}$, $PV=75.471$ 时产生的相位屏

Fig.4 (a) Phase screen $C_n^2=1 \times 10^{-15}$, $PV=24.833$; (b) Phase screen $C_n^2=1 \times 10^{-15}$, $PV=27.013$; (c) Phase screen $C_n^2=1 \times 10^{-17}$, $PV=75.471$

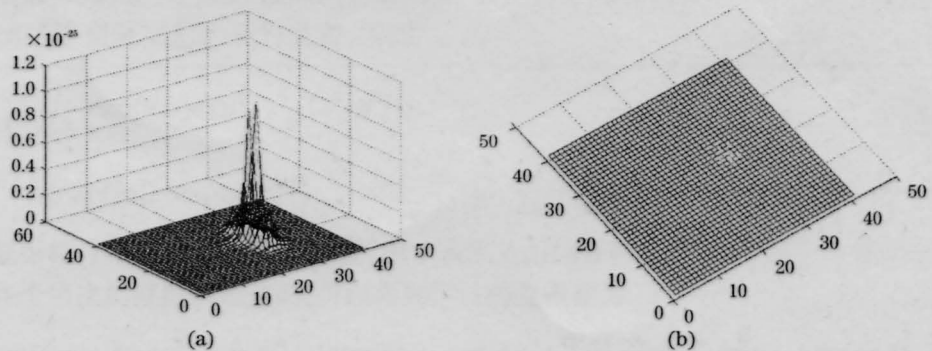


图5 高斯平面光束的湍流传输,2 km。(a) 远场光斑强度分布; (b) 远场光斑平面图

Fig.5 Gaussian plane beam atmospheric propagation 2 km. (a) Facula intensity distribution; (b) Plan of facula in distant laser field in distant laser field

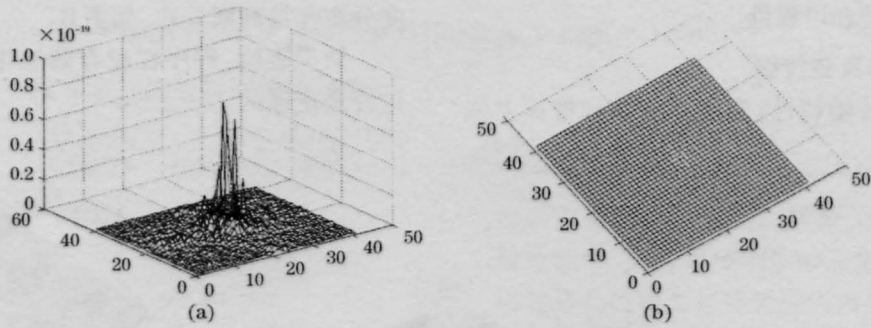


图 6 高斯平面光束的湍流传输, 5 km。(a) 远场光斑强度分布; (b) 远场光斑平面图

Fig.5 Gaussian plane beam atmospheric propagation 2 km. (a) Facula intensity distribution; (b) plan of facula in distant laser field in distant laser field

参 考 文 献

- 1 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Yu Xin *et al.*. Adaptive Optics[M]. Beijing: Defence Industry Press, 1996
周仁忠, 阎吉祥, 俞 信 等. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 2 A. N. Kolmogorov. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large reynold's numbers doklady akad[J]. *Nauk SSSR*, 1941, **30**:301
- 3 D. C. Smith. Thermal defocusing of CO₂ laser radiation in gases[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE-5**:600~607
- 4 Lü Naiguang. Fourier Optic[M]. Beijing: China Machine Press, 1998. 70~75
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 70~75
- 5 Lü Baida. Propagation and Control of High-Power Lasers[M]. Beijing: Defence Industry Press, 1999
吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- 6 Feng Zhichao, Cheng Zheyuan, Xu Bing *et al.*. Laser Physics[M]. Chengdu: Chengdu Telecommunication Engineering Institute Press, 1988. 122~140
冯志超, 程哲源, 许 冰 等. 激光物理[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1988. 122~140