

基于 H-V 模型和 Zernike 法的激光大气传输模拟

许泽帅^{1,2}, 羊毅², 兰卫华², 董涛², 刘玉²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 激光在大气传输时会受到大气湍流等因素的影响, 导致光束质量下降, 影响激光作用效能。针对功率谱反演法产生的相位屏在低频部分表现不足的情况, 利用 H-V 模型对白天和夜晚条件下的激光大气湍流效应进行建模, 采用 Zernike 算法来构造大气湍流相位屏。仿真结果与 Kolmogorov 统计规律符合, 结果显示 Zernike 算法可以对低频部分很好模拟, 随着阶数的提高, 高频部分也能较好体现。针对美国 ABL 系统和 ATL 系统参数对强激光束的大气传输湍流。畸变波前进行仿真分析, 得出 ATL 系统湍流相位屏最大 PV 值约为 3.5λ , ABL 系统湍流相位屏最大 PV 值约为 7.5λ 。研究结果能够对强激光自适应光学系统的技术指标分析提供指导。

关键词: 激光传输; 大气湍流; 波前畸变; H-V 模型; Zernike 法

中图分类号: V271.4 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2014)07-0061-03

Simulation of Laser Transmission in Atmosphere Based on H-V Model and Zernike Algorithm

XU Ze-shuai^{1,2}, YANG Yi², LAN Wei-hua², DONG Tao², LIU Yu²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471009, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: Laser transmission in the atmosphere is influenced by the atmospheric turbulence and other factors, which may degrade the laser beam quality and the operational effect of the laser. The low spatial frequency part usually deviates significantly from theoretic value generated by power spectrum method. To solve the problem, we used H-V model to establish the model of atmospheric turbulence effects on laser at day and night, and the algorithm of Zernike to generate the phase screen of atmospheric turbulence. The result of simulation of atmospheric turbulence meets the Kolmogorov statistics law. The result shows that low-frequency part of atmospheric turbulence can be well reflected by the algorithm of Zernike, and the high-frequency part can also be reflected finely with the increasing of order of Zernike. The system parameters of ABL and ATL of USA were used to simulate the distorted wavefront of high-power laser's atmospheric propagation. The result shows that the maximal P-V value of turbulent phase screen of ATL is about 3.5λ , and is about 7.5λ for the ABL system, which may provide a reference to the design of the adaptive optic system for high-power lasers.

Key words: laser transmission; atmospheric turbulence; wavefront distortion; H-V model; algorithm of Zernike

0 引言

激光通过湍流大气之后就会产生光强起伏、光束漂移、光束扩展和到达角起伏等现象, 这将会使目标上的激光功率密度下降, 影响强激光对远场目标的作用

效果, 因此, 对激光在湍流大气的传输特性进行仿真分析十分必要。

除了用实验和理论分析的方法研究大气湍流, 数值模拟也是研究湍流问题的有效手段。用数值模拟方法研究大气湍流对光学系统影响的核心问题之一是模拟大气湍流畸变相位屏, 有多种方法产生湍流效应随机相位屏, 这些方法基本上分为两类: 1) 根据大气湍流的功率谱密度函数得到大气扰动相位分布, 称为“功率谱反演法”^[1-3]; 2) 用正交的 Zernike 多项式作为展开基函数

收稿日期: 2013-07-22

修回日期: 2013-09-02

基金项目: 航空“十二五”预研项目

作者简介: 许泽帅(1989—), 男, 浙江金华人, 硕士, 研究方向为光学系统设计。

来表示相位波前,称为“Zernike 多项式展开法”^[4-5]。

本文采用 H-V 模型^[6]对白天和夜晚的大气湍流相干长度进行仿真计算,得到的大气湍流相干长度结合 Zernike 法可以对激光大气湍流传输特性进行仿真,进而可以对激光大气传输的自适应光学畸变补偿技术的参数选择提供参考,并可为畸变补偿系统的实验室仿真构建大气湍流模拟屏,对激光大气传输的仿真实证具有十分重要的意义。

1 大气湍流 H-V 模型

激光大气传输湍流模型主要有 H-V 模型和 Hufnagel 模型。H-V 模型可以对白天和夜晚进行仿真,因而本文中采用比较常用的 H-V 模型对大气湍流相干长度进行计算。

由于 C_n^2 是表示大气湍流强度的一个重要参数,国内外对 C_n^2 进行了大量的测量和研究,在实验观察的基础上,提出了 C_n^2 的白天理论模型为

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} (\bar{v}/27)^2 h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + 1.7 \times 10^{-14} \exp(-h/100) \quad (1)$$

式中, \bar{v} 代表风速因子,取为 21 m/s,称作 HV-21 模型。

为了得到夜视条件下的湍流模型,对 H-V 湍流模型进行了改进

$$C_n^2(h) = 8.16 \times 10^{-54} h^{10} \exp(-h/1000) + 3.02 \times 10^{-17} \exp(-h/1500) + 1.9 \times 10^{-15} \exp(-h/100) \quad (2)$$

Freid 引入了大气湍流相干长度 r_0 描述大气对光束传输的积分效应,在 r_0 尺度内波阵面相位差小于 π ,再增大便无同相位性,将产生相干相消,即大气相干长度给出了一个空间尺度,在该空间尺度下的相位误差能被测量和修改。其定义为

$$r_0 = \left\{ 0.423 k^2 \sec \Omega \int_0^L dh C_n^2(h) \right\}^{-3/5} \quad (3)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$, 为波数; Ω 为观察方向的天顶角; L 为激光传输距离; $C_n^2(h)$ 为高度 h 的湍流折射率结构常数。

其中, r_0 的取值范围为几厘米至几十厘米, r_0 越大湍流强度越弱。通常对湍流的强弱做如下划分: r_0 小于等于 5 cm 为强湍流; r_0 大于等于 40 cm 为弱湍流。

2 Zernike 法构造大气湍流

结合第 1 节中的大气湍流相干长度参数,可以构造大气湍流相位屏,对强激光的大气传输波前畸变特性进行仿真分析。功率谱反演法产生的相位屏在高频部分与理论相符,在低频部分明显偏离理论值。本文中采用 Zernike 算法来构造大气湍流相位屏。

大气湍流畸变波前 $\phi(r)$ 可以被分解为在圆域内正交的 Zernike 多项式的形式

$$\phi(r) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j Z_j(r) \quad (4)$$

式中: $Z_j(r)$ 为 Zernike 多项式各项; a_j 为加权系数。

大气波前的 Zernike 系数 a_p 可以是零均值的 Gauss 随机变量

$$\mathbf{A} = [a_2, a_3, \dots, a_p] \quad (5)$$

其协方差阵为

$$\mathbf{C} = \mathbf{E}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T) = \begin{bmatrix} E(a_2, a_2) & E(a_2, a_3) & \dots & E(a_2, a_p) \\ E(a_3, a_2) & E(a_3, a_3) & \dots & E(a_3, a_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E(a_p, a_2) & E(a_p, a_3) & \dots & E(a_p, a_p) \end{bmatrix}。$$

结合发射口径 D 和式(3)得到的大气湍流相干长度 r_0 , 文献[7]给出了两项 Zernike 多项式 Z_i 和 Z_j 系数协方差表达式

$$E(a_j, a_{j'}) = \frac{K_{zz} \delta_z \Gamma\left[\left(n+n'-\frac{5}{3}\right)/2\right] \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3}}{\Gamma\left[\left(n-n'+\frac{17}{3}\right)/2\right] \Gamma\left[\left(n'-n+\frac{17}{3}\right)/2\right] \Gamma\left[\left(n+n'+\frac{23}{3}\right)/2\right]} \quad (6)$$

式中: n, m, n' 及 m' 分别为 Z_j 和 $Z_{j'}$ 的角向级次和径向级次; δ_z 为 Kronecker 逻辑符号, 值为

$$\delta_z = (m = m') \wedge (\text{parity}(j, j')) \vee (m = 0); \quad (7)$$

K_{zz} 为依赖于 Z_j 和 $Z_{j'}$ 频率特征的因子

$$K_{zz} = 2.2698 (-1)^{(n+n'-2m)/2} \sqrt{(n+1)(n'+1)} \quad (8)$$

为了模拟湍流波前, 必须将其表述为有确定方差的随机量的组合, 为此可利用 Karhunen-Loeve 函数, 其波前展开为

$$\phi(r) = \sum_{j=1}^{\infty} b_j \cdot \sum_{j=1}^{\infty} V_{ij} Z_j(r) \quad (9)$$

由式(4)和式(9)可以得到

$$\mathbf{A} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{B} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{E}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}^T) = \mathbf{E}(\mathbf{U} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{U}^T) = \mathbf{U} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T) \cdot \mathbf{U}^T = \mathbf{S}$; \mathbf{S} 为对角阵; \mathbf{B} 的元素彼此互不相关, 由于它是 Gauss 随机变量, 满足统计独立; \mathbf{B} 的元素即是 $K-L$ 函数的各项因子; \mathbf{S} 就是 $K-L$ 函数各系数的方差。

自然, 能够生成 $p-1$ 个具有零均值且方差由对角阵 \mathbf{S} 给出的 Gauss 随机变量, 这些随机变量就是 $K-L$ 函数的系数 \mathbf{B} 。由关系

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}^{-1} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{B} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{B} \quad (11)$$

可以最终得到仿真波前的 Zernike 因子 \mathbf{A} , 然后根据式(4), 就可以仿真出畸变波前。

通过 H-V 模型结合 Zernike 算法, 设计仿真模型如图 1 所示, 由该模型可以对激光大气传输的畸变进行仿真分析和对大气湍流模拟相位屏进行构造。

从图 1 的 Zernike 系数中可以看出, 低阶 Zernike 多项式的系数较大, 随着多项式阶数的增高, Zernike 多项式系数变得很小, 符合在大气湍流中 Kolmogorov

统计规律的理论。

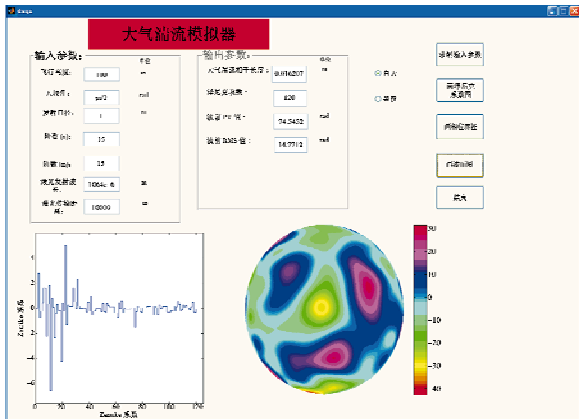


图 1 大气湍流模拟

Fig.1 Atmospheric turbulence simulation

在白天、高度为 100 m、天顶角为 45°、激光发射波长为 1064 nm、发射口径为 1 m、传输距离为 10 km,10 阶 Zernike 系数和 120 阶 Zernike 系数产生的相位屏对比如图 2、图 3 所示。

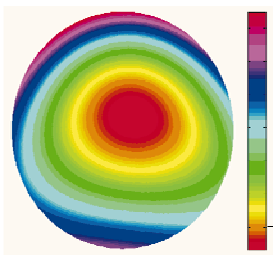


图 2 10 阶 Zernike 系数产生的相位屏

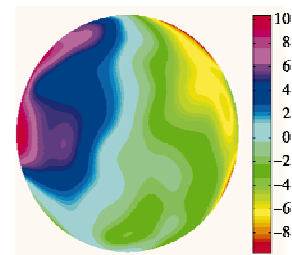


图 3 120 阶 Zernike 系数产生的相位屏

Fig.2 The 10-order Zernike coefficient generated phase screen Fig.3 The 120-order Zernike coefficient generated phase screen

由图 2 和图 3 仿真结果显示,Zernike 算法可以对低频部分很好地模拟,随着阶数的提高,高频部分也能较好体现。

3 激光大气传输湍流畸变波前仿真分析

依据第 2 节建立的激光大气传输模型,结合仿真软件采用 21 阶 Zernike 多项式对 ABL(战略机载激光武器)系统和 ATL(战术机载激光武器)系统进行分析。

3.1 ABL 系统参数分析

ABL 系统参数分析如表 1 所示。

对 ABL 系统典型作战参数进行分析,激光发射角选择了向上 30°、水平和向下 45°,传输距离从 0 m 到 400 km 逐步增加;向下 45°时,假设地表是水平的,目标在地表的上面,可以得出传输距离变化大约为 0 m 到 17 km,画出了 5 次大气湍流相位屏 PV 平均值与相干长度的曲线,如图 4 所示。

表 1 ABL 系统参数典型值

Table 1 The representative value of parameters in ABL system

输入参数	飞行高度/m	发射口径/m	激光发射波长/m	激光传输距离/m	作战环境
典型值	12000	1.5	1.315E-6	400000	白天

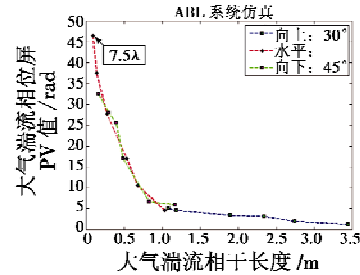


图 4 ABL 系统中大气湍流相位屏峰值和相干长度关系

Fig.4 The PV value of turbulent phase screen vs atmospheric coherent length in ABL system

3.2 ATL 系统参数分析

ATL 系统参数如表 2 所示。

表 2 ATL 系统参数典型值

Table 2 The representative value of parameters in ATL system

输入参数	飞行高度/m	发射口径/m	激光发射波长/m	激光传输距离/m	作战环境
典型值	150	0.14	1.315E-6	12000	白天

对 ATL 系统典型作战参数进行分析,激光发射角选择了向上 30°、水平和向下 45°,传输距离从 0 m 到 12 km 逐步增加;向下 45°时,假设地表是水平的,目标在地表的上面,传输距离变化大约为 0 m 到 212 m,画出了 5 次大气湍流相位屏 PV 平均值与相干长度的曲线,如图 5 所示。

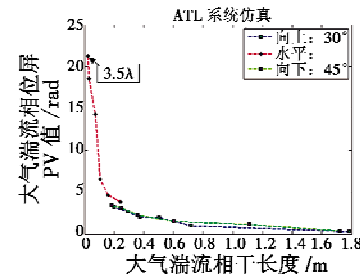


图 5 ATL 系统中湍流相位屏峰值和相干长度关系曲线

Fig.5 The PV value of turbulent phase screen vs atmospheric coherent length in ATL system

由以上对 ABL 系统和 ATL 系统进行的仿真计算,结合图 4 和图 5 可以看出,激光远距离水平传输时波前畸变比较严重,仿真所处的湍流环境基本在中、弱湍流环境下,由曲线的最高点可以得到对大气湍流相位屏 PV 值,仿真得出 ATL 系统的补偿大气湍流所需变

(下转第 77 页)

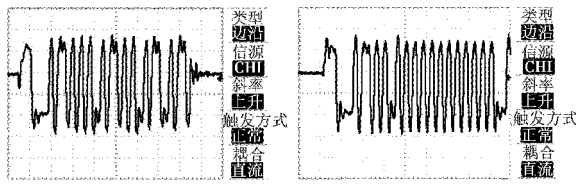


图11 RT→BC命令字和状态字波形

Fig. 11 Waveform of command word and status word RT to BC

5 结束语

本文从总线拓扑结构、硬件结构、传输特性以及总线传输模式等方面详细介绍了 EBR-1553 总线。与传统 1553B 总线相比, EBR-1553 总线具有传输速率快、成本低廉、可携带更多远程终端和软件移植代价小等特点。

EBR-1553 总线已在国外机载武器控制系统和低空飞行器系统等领域广泛应用, 该总线也将成为未来机载武器系统发展的必然趋势, 它对于提高武器集成的效率, 提高机载系统和武器的数据传输能力等方面都有重要的意义。

(上接第 63 页)

形镜的调整量约为 3.5λ , ABL 系统补偿大气湍流所需变形镜的调整量约为 7.5λ 。

4 结论

本文中采用 Zernike 算法和 H-V 模型构造大气湍流相位屏, 完成了不同条件下大气湍流仿真软件的设计, 通过 Matlab 编制仿真界面, 对激光大气湍流传输特性进行仿真, 仿真的大气湍流符合大气湍流 Kolmogorov 统计规律的理论, 仿真结果显示, Zernike 算法可以对低频部分很好地模拟, 随着阶数的提高, 高频部分也能较好地体现。对 ABL 系统和 ATL 系统激光传输湍流畸变波前进行仿真计算, 对大气湍流相位屏 PV 值仿真得出, ATL 系统补偿大气湍流所需变形镜的调整量约为 3.5λ , ABL 系统补偿大气湍流所需变形镜的调整量约为 7.5λ , 从而可以对湍流畸变补偿系统中指标的设计提供参考。

参考文献

- [1] MCGLAMERY B L. Restoration of turbulence-degraded images[J]. JOSA, 1967, 57(3):293-296.
- [2] FLECK J A, MORRIS J R. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. App-

参考文献

- [1] 王朝阳, 季晓光, 丁全心. 机载悬挂物管理系统技术发展分析[J]. 电光与控制, 2009, 16(3):1-5.
WANG Z Y, JI X G, DING Q X. Development of airborne stores management system technology[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(3):1-5.
- [2] 彭志专, 冯金富, 鲁卿, 等. 飞机/悬挂物电气接口标准发展方向探讨[J]. 电光与控制, 2008, 15(4):59-62.
PENG Z Z, FENG J F, LU Q, et al. A survey on the development of aircraft/store electrical interface standard[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(4):59-62.
- [3] SAE Aerospace. AS5652, 10 megabit/sec network configuration digital time division command/response multiplex data bus[S]. SAE, 2005.
- [4] 王旭峰, 丁其伯, 舒振杰. 即插即用武器集成及其相关标准体系初探[J]. 航空标准化与质量, 2009, 4:4-8.
WANG X F, DING Q B, SHU Z J. Discussion on plug-and-play weapons integration and related standard system [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2009, 4:4-8.
- [5] SLEICHER S K. Introduction to enhanced bit rate 1553[R]. Application Note AN/B-40, DDC, 1998.
- [6] 王立瑾, 李强, 魏宏刚, 等. 大气湍流随机相位屏的数值模拟和验证[J]. 光电工程, 2007, 34(3):1-4.
WANG L J, LI Q, WEI H G, et al. Numerical simulation and validation of phase screen distorted by atmospheric turbulence[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(3):1-4.
- [7] 胡朝晖, 姜文汉. 受大气湍流影响的光学波前模拟[J]. 光电工程, 1995, 22(2):50-56.
HU Z H, JIANG W H. Simulation of the optical wavefront distorted by atmospheric turbulence [J]. Opto-Electronic Engineering, 1995, 22(2):50-56.
- [8] 吴晗玲, 严海星, 李新阳, 等. 基于畸变相位波前分形特征产生矩形湍流相屏[J]. 光学学报, 2009, 29(1):114-119.
WU H L, YAN H X, LI X Y, et al. Generation of rectangular turbulence phase screens based on fractal characteristics of distorted wavefront[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1):114-119.
- [9] 苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004:130-132.
SU Y, WAN M. High energy laser systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004:130-132.
- [10] DAI G M. Modified Hartmann-Shack wavefront sensing and iterative wavefront reconstruction [J]. SPIE, 1994, 2201:562-573.