

基于自适应光学的机载激光光束质量校正算法研究^{*}

王秋实^{1,2}, 张亦卓¹, 顾海栋¹

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;
2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

[摘要] 机载激光受大气光学效应影响较为明显, 研究以自适应光学为代表的光束整形系统, 将有效提高激光器作用于目标位置的光束质量。利用光路中的自适应光学变形镜, 以能量反馈方式对机载激光发射单元出射的激光光束质量进行回路校正, 是一种可行方案。采用以随机并行梯度下降法 (SPGD 法) 为代表的优化算法作用于变形镜, 实现返回光能量最大, 从而实现目标上的光束质量提升。通过算法优化及全局收敛仿真, 探求一种较快速收敛的实用性方法, 用于连续激光和重复性好的脉冲激光的光束质量校正。上述算法的仿真研究, 有助于机载条件下的激光在实际大气环境下的效能提升, 具有一定的实用价值。

关键词: 机载激光; 大气光学; 自适应光学; SPGD 法; 光束整形

Study on Algorithm of Beam Quality Correction of Airborne Laser Based on Adaptive Optics

WANG Qiushi^{1,2}, ZHANG Yizhuo¹, GU Haidong¹

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

[ABSTRACT] Airborne laser is influenced by atmospheric optical effect obviously. Thus it is useful to study the beam shaping system represented by adaptive optics, which would effectively improve the beam quality of laser at the target position. It is a feasible solution to use an adaptive mirror in the optical path by energy feedback, to calibrate the laser beam quality emitted by the airborne laser unit. An optimization algorithm, represented by the Stochastic Parallel Gradient Descent method, SPGD method, was applied in the adaptive mirror. It realized the maximum energy of return light, so as to improve the beam quality on the target. By optimizing SPGD algorithm and simulating a global convergence, a practical method of rapid convergence was proposed for beam quality correction of continuous laser and reproducible pulse laser. The simulation of the above algorithm is helpful to improve the performance of laser under an airborne condition, which would have a certain practical value.

Keywords: Airborne laser; Atmospheric optics; Adaptive optics; SPGD method; Beam shaping

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.16.080

激光武器是空对空、空对地及反导的锐利武器。机载激光武器能够攻击精确制导武器瞄准、跟踪、制导、攻击过程中的薄弱环节, 降低敌方精确制导武器的攻击精度^[1]。机载激光的光束传播受天气状况及大气湍流等影响极大, 为了实现激光对于目标打击的精确性和可靠性, 降低大气传输对于激光光束的影响, 开展激光光束质量控制研究对提高机载激光打击效能具有重要意义^[2]。解决上述问题的工程手段之一, 是基于自适应光学方法, 增加自适应变形镜以补偿大气传输中湍流带来

的光束畸变, 从而在目标上投射出最佳光斑^[3]。美国的 ABL 机载激光项目的 YAL-1A 验证机中, 首次采用了自适应光学技术对于机载激光进行了优化, 但并未公开算法^[4]。成都光电所的李新阳等^[5]通过理论分析, 给出数种自适应优化算法的解决方案^[6]。

本文通过理论分析激光在大气湍流影响下的传输模式, 计算远场 TEM₀₀ 激光的强度和相位分布, 以此对远场激光的光束质量校正进行评价。通过对机载激光光束质量校正算法研究, 探求适用于机载激光的 SPGD 算法及全局参数优化适配仿真, 用于连续激光和重复性好的脉冲激光的光束质量校正。模拟结果表明, SPGD

^{*} 基金项目: 航空基金支持项目 (2016ZC25002); 陆军装备部航空装备局装备预先研究基金支持项目 (30104031004)。

校正算法是机载环境下,一种能够进行光束质量优化、较快速收敛的实用性方法。

1 激光大气传输中的光束畸变

激光在大气传输中将受到大气的吸收/散射消光,大气湍流和大气热晕等影响,上述大气的效应将使光束质量下降,进而影响到目标处的光斑质量。由于大气吸收条件已经有了广泛而深入的研究,本节主要研究大气湍流环境下,激光的传输特性。

1.1 大气湍流

大气湍流的状态将导致其折射率随空间和时间作无规则的变化。激光辐射在大气的传播过程中,将因为大气湍流随机改变激光的特性,致使激光强度(功率)、位相等参量,在时间和空间上都呈现随机的起伏,出现沿传播方向上激光光束的弯曲、方向抖动;光束截面方向内的强度闪烁、光斑的弥散畸变和空间相干性退化等现象,上述现象统称为激光的大气湍流效应^[7]。

光束的弯曲和方向抖动又称为光束漂移,将使得激光偏离接受孔径,导致接受面激光信号强度的降低;强度闪烁是激光在湍流大气传播时由于大气折射率起伏使得散射强度起伏,导致信噪比的降低;光束的空间相干性退化,将使得激光的光束发散,造成接受面能量密度的下降。其中影响较大的是光束漂移和光强闪烁,图1是大气湍流效应造成的光束漂移和光强闪烁的效果示意图。

大气湍流具有随机性、非线性、涡旋性等基本特征,基于空间尺度分析和各项同性的简化,Kolmogorov^[8]提出了目前最成熟、应用最广泛的大气湍流统计理论,依据Kolmogorov大气涡旋统计理论得到的折射率结构常数 C_n^2 ,是评估折射率起伏强度和大气湍流强度的重要参量,对于地表100m高度内的大气层, C_n^2 一般在

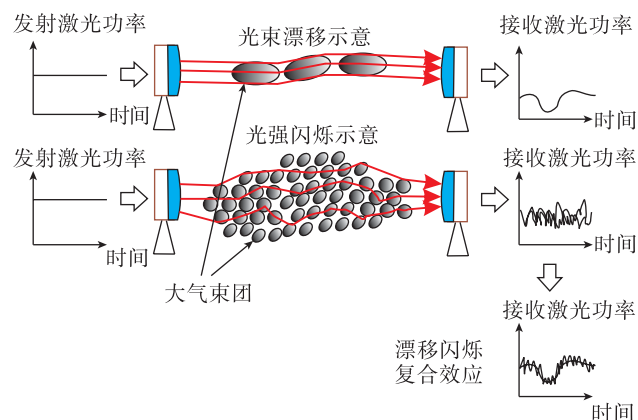


图1 大气湍流效应造成的光束漂移和光强闪烁的示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser beam drift and intensity scintillation caused by atmospheric turbulence effect

$10^{-15} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 之间变化。通常,定义 $C_n^2 \leq 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 为弱湍流条件,对应的 $C_n^2 \geq 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 为强湍流条件,二者之间为中等湍流条件。通常情况下,在一定地表高度和传输距离,以及较短的时间间隔内, C_n^2 可以视为常数,并且随着海拔的增加,以 $-2/3$ 幂次减弱;同时 C_n^2 受地表状况、大气温度、风速、云层厚度和日照时间等多重因素影响,大气湍流在白天加强,晚上减弱。 C_n^2 的代表性研究是Kolmogorov给出的大气折射率起伏功率谱^[9]:

$$\Theta_n(k) = 0.033 C_n^2 k^{11/3} \quad (1)$$

其中,波数 $k=2\pi/l$, l 为湍流涡旋的尺度。

进一步地,Tatarskii推广了Kolmogorov功率谱,引入 $k_m=5.92/l_0$,给出了耗散区功率谱函数^[10]:

$$\Theta_n(k) = 0.033 C_n^2 k^{11/3} \exp\left(-\frac{k^2}{k_m^2}\right) \quad (2)$$

Von Karman对于Tatarskii做了进一步修正,引入 $k_0=2\pi/l_0$ 得到:

$$\Theta_n(k) = 0.033 C_n^2 \frac{\exp\left(-\frac{k^2}{k_m^2}\right)}{(k^2+k_0^2)^{11/6}} \quad (3)$$

在“惯性子区”内,Tatarskii谱和Von Karman谱均退化为Kolmogorov功率谱式(1)^[11]。

值得指出的是,当激光处于斜入射状态(如通过大气对流层和平流层)时,大气湍流在时间和空间上不是平稳和均匀的,大气湍流存在相干结构、各向异性等特点^[12],Kolmogorov功率谱计算结果和实际测量有着较大偏差。具体表现在Kolmogorov功率谱的指数项 α 应随着海拔的高度变化而变化($3 < \alpha < 5$)。考虑到采用的系统模型是机载激光器,其所工作的环境大气海拔有限,故而依旧可以采用Kolmogorov功率谱进行模拟计算,即采用进一步修正的Von Karman谱。

1.2 激光束在大气湍流传输中的分析

下面的计算是基于理论的分析,首先定义在激光发射窗的平面处($z=0$)的圆形高斯光束:

$$U_0(r, 0) = A \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2} - i \frac{kr^2}{2F_0}\right) \quad (4)$$

式中, A 是激光振幅, ω_0 是发射平面相位波的激光光束束腰半径, $r(x, y)$ 是平面分布, F_0 是对应的曲率半径, k 为波数,当经过自由空间传输到 $z=L$ 的平面后,得到新的光场:

$$U_0(r, L) = \frac{A}{p(L)} \exp(ikL) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2} - i \frac{kr^2}{2F}\right) \quad (5)$$

式中, ω 是传输到 L 位置时相位波的激光光束束腰半径, F 是对应的曲率半径。

$$p(L) = 1 - \frac{L}{F_0} + i \frac{2L}{k\omega_0^2} \quad (6)$$

其中,实部 $1 - \frac{L}{F_0}$ 是输入面的曲率参数,虚部 $\frac{2L}{k\omega_0^2}$ 是非涅

尔比。利用一阶光场微扰理论和菲涅尔衍射积分公式可以得出,远场光强分布:

$$U_1(r, L) = \frac{k^2}{2\pi\omega_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A d^2s \cdot \exp[ik(L-z)] \times \exp\left[\frac{ik|r-s|^2}{2(L-z)}\right] \cdot U_0(s, z) \cdot \frac{m(s, z)}{L-z} \quad (7)$$

上述的远场光强分布函数可以写作一个对数振幅结构函数,和一个相位结构函数,在几何光学近似条件下,利用Kolmogorov功率谱可以得到归一化起伏球面方差 $D(r, L)$ 的公式, Andrews 给出了整个计算过程,这里只给出结果^[13]:

$$D(r, L) = 1.09 C_n^2 k^7 L^{11} \left[a \left(\frac{kr^2}{L} \right)^{\frac{5}{6}} + 0.62 \left(\frac{2L}{k\omega_0^2} \right)^{\frac{11}{6}} \left(\frac{kr^2}{L} \right) \right] \quad (8)$$

类似地,由大尺度的湍流折射效应引起的接受面光斑重心的漂移,平行光束表达式为:

$$\langle r_c^2 \rangle = 2.42 C_n^2 L^3 \omega_0^{-1/3} \quad (9)$$

结合式(7)~(9),可以得出 TEM₀₀ 基模的高斯光束,在仅受大气湍流作用的情况下,通过大气传输后的光强分布表达式:

$$I(r, L) = |U_0(r, L)|^2 = A^2 \times \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \times \exp\left[-\frac{2(x^2+y^2)}{\omega^2}\right] = I_0 \times \frac{k\omega_0}{k\omega_0 \left[1 + \left(\frac{2L}{k\omega_0^2}\right)^2\right] + 3.25L \left(1.23 C_n^2 k^7 L^{11}\right)^{\frac{5}{6}} \left[1 + \left(\frac{2L}{k\omega_0^2}\right)^2\right]^{\frac{11}{6}}} \times \exp\left\{-\frac{2k(x^2+y^2)}{\omega_0} \cdot \frac{1}{k\omega_0 \left[1 + \left(\frac{2L}{k\omega_0^2}\right)^2\right] + 3.25L \left(1.23 C_n^2 k^7 L^{11}\right)^{\frac{5}{6}} \left[1 + \left(\frac{2L}{k\omega_0^2}\right)^2\right]^{\frac{11}{6}}}\right\} \quad (10)$$

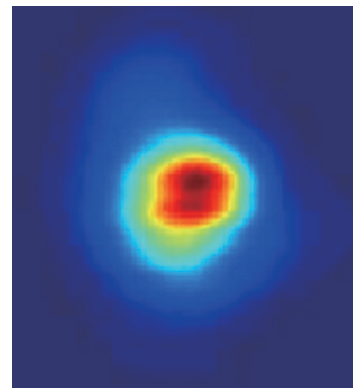
公式(10)表明 TEM₀₀ 基模的高斯光束,在仅受大气湍流作用的情况下,通过大气传输后的光强分布表达式,该表达式的影响因素有激光出口光强(光功率) I_0 , 发射平面相位波的激光光束束腰半径 ω_0 , 波数 k , 传输距离 L 和大气折射率结构常数 C_n^2 , 利用该公式,进行光强模拟计算。图 2 是 TEM₀₀ 基模的高斯光束在随机大气湍流作用下,传输 1km 的光强和相位分布结果。

上述模拟结果可以进行实验室环境下的仿真试验。一种实验室模拟大气湍流的方案是利用泽尼克(Zernike)多项式构造相位屏,并利用“多相位屏”法模拟光束在湍流大气中的传输,用来分析各阶像差的影响^[14]。“多相位屏”法把传输路径分为 n 段,在每一段距离 Δn 中,近似将本段大气湍流对传输光束的影响作为一个放在中间的薄屏。激光光束通过相位屏时,只有相位受折射率随机起伏的影响,产生强烈的相位调制,振幅保持不变。即光束在经过 $\Delta n/2$ 的自由空间传输后,加上本段大气湍流对相位造成的畸变,再传播 $\Delta n/2$ 的自由空间,即完成了本段的传输^[15]。

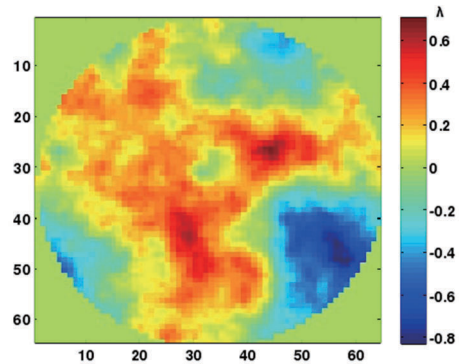
图 3 描述了一种多相位屏方案,入射激光通过 3 块类 Zernike 相位屏后,在 1km 外的远场的光斑分布。该

随机相位屏取 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ 的中等强度湍流条件,强度分布采用式(10)中的光强因子。利用光学追迹仿真软件 TracePro,对 TEM₀₀ 基模的高斯光束在空间场的传播,采用了 4.7 万条光线进行了入射激光通过随机相位屏的追迹,远场接受 CCD 上的光斑图像,如图 4 所示,光斑强度出现了非对称性弥散,表明激光波前相位存在扰动。图 4 和图 2 的模拟结论表明,大气湍流对于激光传输的影响,从结果上等同于某种特定分布的相位屏的影响。

由于大气湍流条件复杂,激光在大气中传输受到大



(a) 光强分布



(b) 相位分布

图 2 TEM₀₀基模的高斯光束通过1km大气传输后的光强分布和相位分布

Fig.2 Distribution of a TEM₀₀ mode Gaussian beam after 1km atmospheric transmission: light intensity and phase distribution

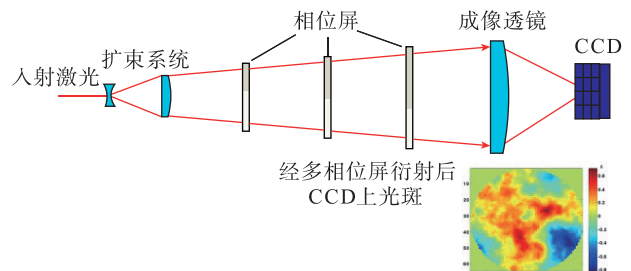


图 3 一种多相位屏模拟大气湍流的实验室方案

Fig.3 A laboratory simulation of multi-phase screen by atmospheric turbulence

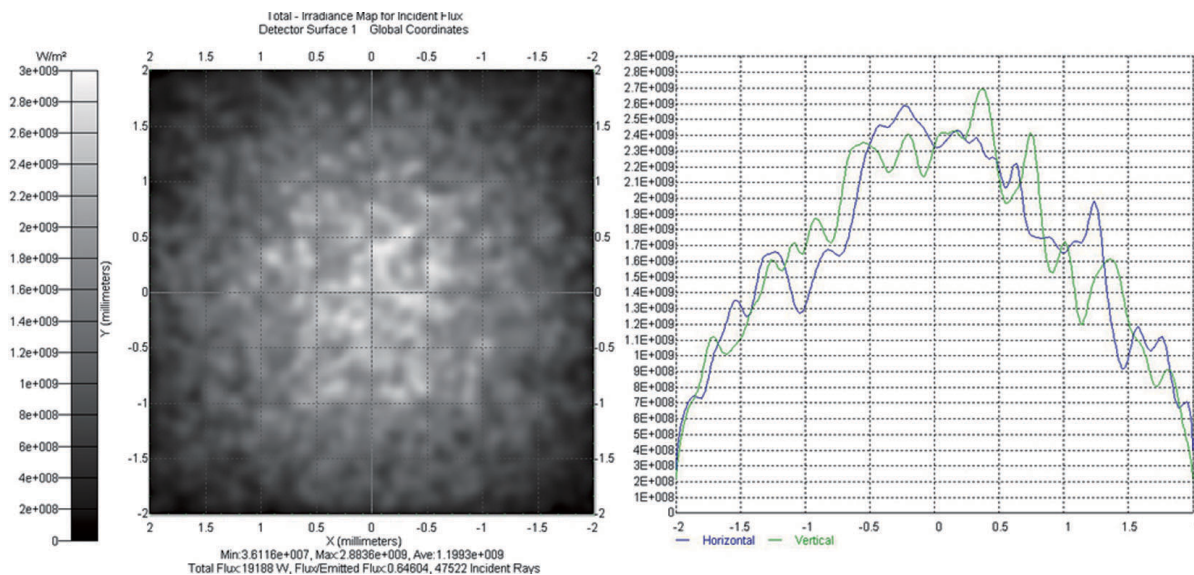


图4 利用TracePro追迹模拟的相位屏1km远场光斑分布图样
Fig.4 A far field (1km away) phase screen beam pattern simulated by TracePro

气吸收和大气湍流的综合影响,将导致激光强度(功率)和相位的双重改变。在实验室中对大气湍流影响的仿真验证,对于系统光束质量校正及自适应算法优化等方面具有重要的参考价值。

2 自适应变形镜的SPGD校正算法研究

自适应光学技术能够对激光进行实时光波前畸变校正,是补偿单光束波前畸变、获得高功率密度激光的有效手段,因此在大气激光传输中得到了广泛的应用。自适应光学多以较低功率的激光(信标光)照射目标,信标光从目标处反射回后,进入到波前传感器装置,能够测量到目标路径的光束横截面的变形。最常用的波前传感器装置是哈特曼-夏克(Hartmann-Shack, H-S)波前传感器,相当于在CCD等可成像装置的前面放置的一组小“透镜列”。该透镜阵列是由若干个等焦距的小凸透镜排列而成,将待测波前划分为若干个子孔径区域,经过每一子孔径的光波可近似为平面波,根据其x、y方向上倾角度不同,经过微透镜后其聚焦光斑质心落在CCD子区域不同的像素点上,被测子波面在y轴方向的斜率 $\tan\alpha = \Delta z / \Delta y = \delta y / f_{ML}$ 。依据被测第*i, j*子孔径波前光斑质心与参考波前质心位置的偏差量 $(\delta_x, \delta_y)_{i,j}$,由式(11)可求得空间采样点波面的斜率 $(\beta_x, \beta_y)_{i,j}$,其中 f_{ML} 为微透镜的焦距^[16]。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \omega}{\partial x} \\ \frac{\partial \omega}{\partial y} \end{pmatrix}_{i,j} = \begin{pmatrix} \beta_x \\ \beta_y \end{pmatrix}_{i,j} \approx \frac{1}{f_{ML}} \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta y \end{pmatrix}_{i,j} \quad (11)$$

在波前传感器提取光束横截面的变形之后,利用高

精度的变形镜,对激光波前进行重构,是实现激光波前畸变进行补偿和控制,提高光束质量的重要前提。波前重构过程包括3个步骤:质心计算、斜率计算、波前重构。一个根本的要求是,当波前畸变最小时,系统性能评价函数达到一个极值。波前重构方法常用的有爬山法、遗传法、随机并行梯度下降算法(SPGD法),多抖动法,模式提取法等^[17]。其中随机并行梯度下降法(SPGD法)的全局校正方式收敛速度较快,实际应用性较强。本文采用的算法如下:

考虑存在波前畸变的光场为:

$E(x, y) = A(x, y) \exp\{-i[\varphi^0(x, y) + \varphi^n(x, y)]\}$, 其中:
 $A(x, y)$ 为振幅; $\varphi^0(x, y)$ 为光束的固有波前; $\varphi^n(x, y)$ 为畸变叠加的波前。根据自适应光学的特性,在其中增加补偿波前 $\Psi(x, y)$ 后,将得到:

$$E(x, y) = A(x, y) \exp\{-i[\varphi^0(x, y) + \varphi^n(x, y) + \Psi(x, y)]\},$$

以下采用 $\Phi(x, y) = \varphi^0(x, y) + \varphi^n(x, y) + \Psi(x, y)$ 表示相位项。

传输距离一定时,远场光强是初始光强 $I_0(t)$ 和相位项 $\Phi(x, y)$ 的函数,远场光强可以写作:

$$\begin{aligned} I = \text{Re}\{E(x, y, z_f)\}^2 = \\ \text{Re}\left\{\frac{1}{(\lambda z_f)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x_n, y_n) A(x'_n, y'_n) \right. \\ \left. \exp\{-i[\Phi(x_n, y_n) - \Phi(x'_n, y'_n)]\} \times \right. \\ \left. \exp\left[-\frac{jk}{z_f}(xx_n + yy_n - xx'_n - yy'_n)\right] dx_n dy_n dx'_n dy'_n\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

参考式(11)中关于波前质心位置的偏差量 $(\delta x, \delta y)_{i,j}$ 建立远场光强函数,并同样建立关于中心光强的

性能评价函数 $J=f[I_0(t),\varphi^0(x,y)+\varphi^n(x,y)+\Psi(x,y)]$ 。该性能评价函数 J 是光强的函数,那么在算法迭代的有限时间内,假定外界大气条件下相位噪声没有变化,则性能评价函数 J 仅仅是补偿相位 $\Psi(x,y)$ 的函数。

SPGD 算法的迭代公式为:

$$U_m^{(k+1)}=U_m^{(k)}+\gamma\cdot\delta J^{(k)}\cdot\delta U_m^{(k)}$$

其中, m 为控制通道序数, γ 为迭代的步长, $\delta J^{(k)}$ 为扰动前后性能评价函数的变化量, $\delta U_m^{(k)}$ 为统计独立的随机扰动大小。该算法的执行步骤描述如下:

生成随机扰动向量,并转换为电压信号 $\delta U=\{\delta U_1, \delta U_2, \delta U_3, \dots, \delta U_m\}$,随机扰动 $\{\delta U_m\}$ 满足均值为 0,方差相等,即 $\langle \delta U_m \rangle = 0, \langle \delta U_{mi}, \delta U_{mj} \rangle = \sigma^2 \delta_{mij}$ 。

将随机正向扰动电压 $+\delta U$ 施加到波前校正器的各个驱动器上,取得评价函数的值 $J^+=J(U+\delta U)$ 和负向扰动电压 $-\delta U$ 和对应的评价函数 $J^-=J(U-\delta U)$ 。

计算两次扰动过程中评价函数的变化量 $\delta J=\frac{1}{2}(J^+-J^-)$,如果 $\delta J>0$,则更新控制电压为 $U_m^*=U_m+\delta U_m$; 如果 $\delta J<0$,则更新控制电压为 $U_m^*=U_m-\delta U_m$;

根据算法迭代公式更新控制参数,直到收敛为某个阈值,或人工停止算法的执行。

利用上述 SPGD 算法对 6×6 单元变形镜进行系统校正,图 5 仿真结果显示,约 100 次计算即可完成。当循环计算结束时,目标光斑强度和波前分布均有明显提升。考虑到机载激光工作环境下,实际情况难以提取返回激光波前,该算法也同样适用于以能量作为参数优化的情况。图 6 介绍了该算法的流程框图,通过实现返回光能量最大,从而实现目标上的光束质量提升。

3 结论

本文以提高远场目标处的激光功率密度为目的,通过理论分析激光在大气湍流影响下的传输模式,利用

Matlab 计算软件模拟了 1km 处的 TEM₀₀ 激光的强度和相位分布。通过多相位屏法构建了一个中等强度湍流场,利用 TracePro 光学追迹软件仿真,给出了 1km 外激光远场强度分布。上述模拟结果可以进行实验室环境下的仿真试验,如利用不同衰减系数的激光衰减片模拟不同的距离,利用多层随机相位板模拟不同条件的大气湍流,模拟典型的长距离传输条件用于试验阶段的验证。

利用 SPGD 算法,通过全局参数优化适配仿真,探求一种适用于机载环境的,较快速收敛的实用性方法。模拟结果表明,SPGD 校正算法可以用于连续激光和重复性好的脉冲激光的光束质量校正。上述算法的仿真研究,有助于机载条件下的激光器效能提升,具有一定的实用价值。

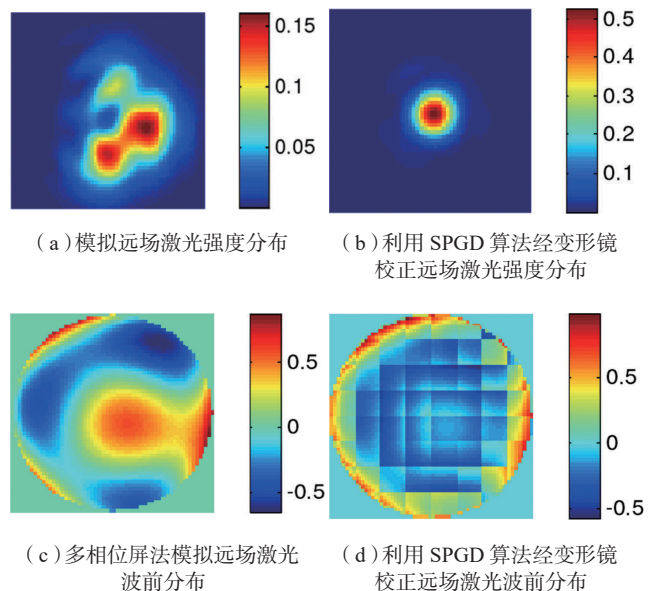


图5 利用SPGD算法对变形镜校正的仿真结果
Fig.5 Simulation result of SPGD correction algorithm optimized in deformable mirrors

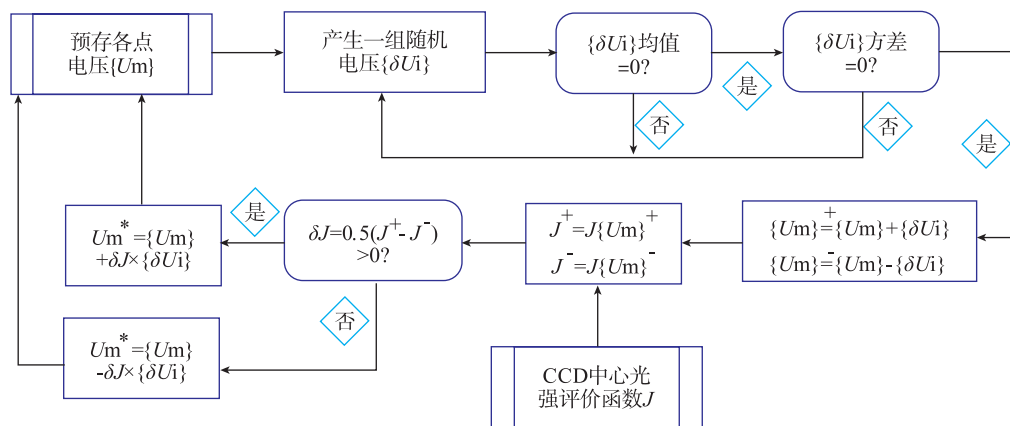


图6 用于机载自适应变形镜的SPGD算法流程框图

Fig.6 Flow chart of SPGD algorithm for airborne adaptive deformable mirrors

(下转第 101 页)

参考文献

- [1] BLANCHOT V, DAIDIE A. Riveted assembly modelling: study and numerical characterisation of a riveting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 180(1-3): 201-209.
- [2] ZHANG K F, CHENG H, LI Y. Riveting process modeling and simulating for deformation analysis of aircraft's thin-walled sheet-metal parts[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(3): 369-377.
- [3] 刘平, 张开富, 李原. 铆接变形及其有限元分析[J]. 航空制造技术, 2008, 51(22): 94-97.
- LIU Ping, ZHANG Kaifu, LI Yuan. Riveting deformation and finite element analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(22): 94-97.
- [4] 郭庆, 蒋万青. 基于 CAD-CAE 计算铆钉连接件疲劳寿命[J]. 机械设计, 2007, 24(4): 261-265.
- GUO Qing, JIANG Wanqing. Calculation of fatigue life of rivet connection based on CAD-CAE[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(4): 261-265.
- [5] MANES A, GIGLIO M, VIGANO F. Effect of riveting process parameters on the local stress field of a T-joint[J]. International Journal of Mechanical Science, 2011, 53(12): 1039-1049.
- [6] ATRE A, JOHNSON W S. 3D FEA simulations to assess residual stresses in riveting process[J]. Journal of ASTM International, 2005, 3(3): 1-10.
- [7] KADAM R. Vibration characterization and numerical modeling of a pneumatic impact hammer[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
- [8] BLOXSOM W. Modeling of the reciprocating, pneumatic impact hammer[D]. Las Vegas: University of Nevada, 2003.
- [9] LI Y W, XI F F, BEHDINAN K. Dynamic modeling and simulation of percussive impact riveting for robotic automation[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2010, 5(2): 1090-1097.
- [10] 曲巍巍, 石鑫, 董辉跃, 等. 气动锤铆过程仿真分析与试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(8): 1411-1418.
- QU Weiwei, SHI Xin, DONG Huiyue, et al. Simulation analysis and test of dynamic hammer riveting process[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(8): 1411-1418.

通讯作者: 姜春英, 博士, 副教授, 研究方向为飞机蒙皮铆接技术, E-mail: jiangchunying@hotmail.com。

(责编 铃兰)

(上接第 84 页)

参考文献

- [1] 齐予, 易亨瑜. 国外机载激光武器技术进展 [C]// 2012 国防空天信息技术前沿论坛. 西安, 2010.
- QI Yu, YI Hengyu. Technology progress of foreign airborne laser weapon[C]//Forum of 2010 Frontiers in defense, aerospace and information technology. Xi'an, 2010.
- [2] VORONTSOV M. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): system architecture and wave front control concept[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5895(1): 1-9.
- [3] TYSON R K. Principles of adaptive optics[M]. Boston: Academic Press, 1997.
- [4] U.S. Department of Defense. Model designation of military aerospace vehicles: DoD 4120.15-L [S]. Washington: U.S.Department of Defense, 2004.
- [5] 李新阳, 姜文汉, 王春红, 等. 自适应光学系统中的自适应

控制算法研究[J]. 光学学报, 2001, 21(3): 283-291.

LI Xinyang, JIANG Wenhan, WANG Chunhong, et al. Analysis of an adaptive control algorithm used in an adaptive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 283-291.

[6] 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 11-16.

YANG Huizhen, LI Xinyang, JIANG Wenhan. Comparison of several stochastic parallel optimization control algorithms for adaptive optics system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 11-16.

[7] KAZAURA K, OMAE K, SUZUKI T, et al. Enhancing performance of next generation FSO communication systems using soft computing based predictions[J]. Optical Express, 2006, 14(12): 4958-4968.

[8] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2005.

[9] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. A new theory of optical scintillation for moderate to strong fluctuations[J]. Optical Pulse and Beam Propagation, 1999, 3609: 90-100.

[10] TATARSKII V. Some new aspects in the problem of waves and turbulence[J]. Radio Sciences, 1987, 22(6): 859-865.

[11] PHILLIPS R L, ANDREWS L C. Universal statistical model for irradiance fluctuations in a turbulent medium[J]. Journal of the Optical Society of America, 1982, 72(7): 864-870.

[12] 张逸新, 王高刚. 斜程大气传输激光束的平均光强与短期光束扩展[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 167-170.

ZHANG Yixin, WANG Gaogang. Average intensity and short-term beam spread of a laser beam propagating in a slant-path atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 167-170.

[13] ANDREWS L C, Special functions of mathematics for engineers[M]. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998.

[14] 段梦云, 艾勇, 熊准, 等. 激光大气传输室内模拟研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(3): 188-193.

DUAN Mengyun, AI Yong, XIONG Zhun, et al. Simulation of laser atmospheric transmission in laboratory[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(3): 188-193.

[15] 周朴, 刘泽金, 许晓军, 等. 自适应锁相光纤激光阵列的湍流大气传输性能[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1442-1447.

ZHOU Pu, LIU Zejin, XU Xiaojun, et al. Propagation performance of adaptive phase-locked fiber laser array in turbulent atmosphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(6): 1442-1447.

[16] 程利群, 景文博, 王晓曼. 夏克-哈特曼波前传感器光斑质心探测方法比较与分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 23-26.

CHENG Liqun, JING Wenbo, WANG Xiaoman. Comparison and analysis of shack-hartmann wave-front sensor spot centroid detection methods[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 37(3): 23-26.

[17] 范玲, 乔春红, 冯晓星, 等. 基于 SPGD 算法的激光大气传输湍流效应校正的初步研究[J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4(3): 183-189.

FAN Ling, QIAO Chunhong, FENG Xiaoxing, et al. Elementary study on turbulence effects resulted from laser propagation in the atmosphere based on the stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(3): 183-189.

通讯作者: 王秋实, 工学博士、工程师, 研究方向为精密光学检测、激光系统设计和自适应光束质量校正等, E-mail: wangqiushi210@mails.ucas.ac.cn。

(责编 铃兰)