

盐水和沙子上方传输激光束波前畸变校正的对比研究

杨 萍¹, 宋 宏^{2,3}, 楼利旋², 刘腾君², 张嘉恒², 王杭州², 詹舒越², 黄 慧², 穆全全⁴, 杨文静⁵

(1. 杭州电子科技大学 数字媒体与艺术设计学院, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021;

3. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012;

4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

5. 杭州蓝科光电科技有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 主要研究激光束在盐水和沙子两种下垫面上方传输时的波前特性, 并采用自适应光学系统对波前畸变进行校正。建立了激光传输实验平台, 基于自适应光学系统的输入输出数据建立了自适应光学系统模型, 基于该模型设计了自适应光学系统闭环控制器, 对比了激光束在两种下垫面上方传输时的波前畸变特性与自适应光学系统校正的差异。实验结果显示, 在同样辐射加热的条件下, 沙面上方的空气湍流对激光束波前影响更剧烈, 经自适应光学系统校正后, 波前传感器点位移方差在盐水情况下减少了 28%, 而在沙子情况下减少了 10%。该研究为在海洋环境中利用闭环自适应光学系统进行光束波前畸变校正的可行性做出了初步探索。

关键词: 自适应光学; 波前畸变校正; 激光传输; 海洋环境

中图分类号: TP273.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0432001

Comparison on wavefront aberration correction for laser beam propagating over saline water and sands

Yang Ping¹, Song Hong^{2,3}, Lou Lixuan², Liu Tengjun², Zhang Jiaheng², Wang Hangzhou²,
Zhan Shuyue², Huang Hui², Mu Quanquan⁴, Yang Wenjing⁵

(1. School of Media & Design, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China;

3. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou 310012, China;

4. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 5. Blue-Science Opto-Electronics Co. Ltd, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Wavefront aberration characterization and correction in laser beam propagating over saline water and sand was investigated in this paper. An experimental setup was built for wavefront aberration measurement and correction by an adaptive optics(AO) system. Based on the input-output data of the AO system, a model was established for the AO system and a closed-loop controller was built. Experimental results show that the laser beam propagating over sands suffers more severe wavefront aberration by the

收稿日期: 2015-08-11; 修订日期: 2015-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(11304278); 国家 863 计划(2014AA093409); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室

(国家海洋局第二海洋研究所)开放基金(SOED1606); 飞行器海上测量与控制联合实验室开放基金(FoM2015OF003)

作者简介: 杨萍(1981-), 女, 讲师, 博士, 主要从事光谱成像、自适应光学等研究。Email: yangping@hdu.edu.cn

通讯作者: 宋宏(1981-), 男, 讲师, 硕士生导师, 博士, 主要从事自适应光学、海洋光学方面的研究工作。Email: hongsong@zju.edu.cn

turbulence. After closed-loop AO correction, the variance of the spots displacement in the wavefront sensor is reduced by 28% for saline water and 10% for sands. By doing this research, the feasibility of using close-loop AO systems for wavefront aberration correction in marine environment is investigated.

Key words: adaptive optics; wavefront aberration correction; laser propagation; marine environment

0 引言

无线激光通信是一种在自由空间中使用激光进行数据传输的通信方式^[1],具有传输速率高、不需要传输介质、便携以及抗电磁干扰等特点,在岛屿和海上终端的通信中具有广阔的应用前景^[2]。

然而,在海面上进行无线激光通信的过程中,激光束除了受到大气的吸收和散射外,还受到大气湍流的影响^[3]。大气湍流引起大气的折射率不仅在空间分布不均匀,而且还会随着时间发生随机动态变化,导致光束的波前在传播过程中发生动态畸变^[4]。接收端的光束会出现闪烁、漂移、到达角起伏等现象^[5-8],在很大程度上降低了通信的可靠性,限制了通信带宽和通信距离。

海面大气湍流与陆地大气湍流相比,其特殊性主要体现在:(1)海水的蒸发使得海面大气中的水分子浓度比陆地更高,大气湿度更大,而水分子浓度的增加使得光束在大气中传播的过程变得更加复杂,对光束的强度和波前均会产生一定影响^[9];(2)由于海水的热容量比陆地大,因此海-气温差一般比地-气温差更小,海-气热交换不如地-气热交换强烈;但是海风的作用却大大加快了大气流动的速度,尤其在与陆地比较接近的海域,海陆温差引起的强劲的海陆风使得大气湍流的动态变化较陆地更剧烈^[10-12]。

国内外对于跨海传输激光束的研究主要集中在光束闪烁的测量与统计^[13]、光束漂移特性的研究^[14-15]、Fried 参数计算^[16]、大气折射率结构常数计算等^[17-18],尚未对波前畸变展开深入研究。在天文观测领域,已有研究人员利用自适应光学系统(Adaptive Optics, AO)对光束的波前畸变进行测量和校正^[19-20],但主要围绕垂直方向传输的激光束展开,而对跨海水平传输激光束(尤其是在光束距离水面较近的情况下)的研究较少。

文中研究了在实验室环境下,激光束在盐水上方传输时光束波前畸变的特性,并使用闭环 AO 系统对波前畸变进行了校正。实验结果与激光束在沙

子上方的传输结果进行了对比。文中的创新点在于:研究了激光束在两种下垫面上方传输时光束波前畸变的特性,以及使用自适应光学系统进行波前畸变校正的差异,探讨了在海洋环境中使用闭环 AO 系统的可行性。

1 实验装置

为了对激光束的波前畸变进行测量、并且测试闭环 AO 系统对光束波前畸变的矫正效果,在实验室中搭建了实验平台如图 1 所示,该实验平台主要由激光发射装置(光学平台 T1)、光束波前畸变测量和校正装置(光学平台 T2)和大气湍流模拟装置(包括水槽和加热器)几个部分组成。实验平台照片如图 2 所示。

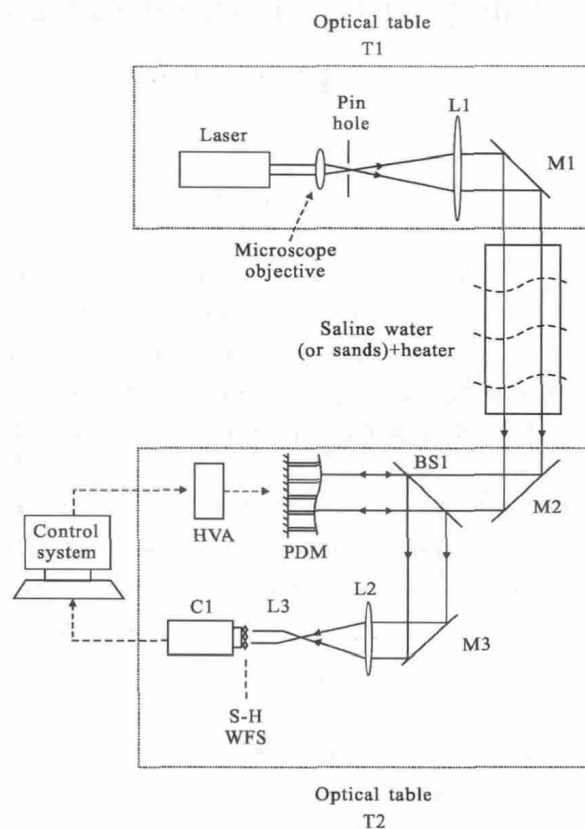


图 1 实验平台结构图

Fig.1 Schematic of the experimental setup under investigation

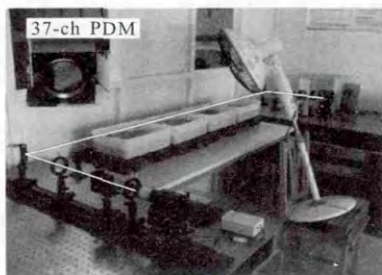


图 2 实验设备实体图

Fig.2 Photo of the experimental setup

实验平台工作原理如下。从氦氖激光器 (波长 632.8 nm, 2 mW) 发射的激光束首先通过显微镜物镜 (放大倍数为 20 倍,) 和小孔 (直径 20 μm) 进行空间滤波。滤波后的光束通过透镜 L1 准直为平行光束, 光束直径 1.2 cm。

平行光束经过平面镜 M1 和 M2 的反射穿过分光镜 BS1 又被压电可变形反射镜 (PDM, OKO Tech) 反射。压电可变形反射镜具有 37 个执行单元。光束被 PDM 反射后, 又经过 BS1 和平面镜 M3 的反射经由透镜 L2 和 L3 进入夏克-哈特曼波前传感器 (S-H WFS)。在对光束波前畸变进行特性化研究时, 系统处于开环状态, PDM 不产生形变, 仅仅依靠 S-H WFS 对波前畸变进行测量。在畸变校正的研究中, S-H WFS 的测量信号被输入控制器, 控制器根据残存的波前畸变计算 PDM 控制信号, 使得畸变残差最小。

光学平台 T1 和 T2 之间的桌子上有 4 个容器装有盐水和沙子, 每一个容器长为 40 cm, 宽为 25 cm。激光束的中心在盐水 (或沙子) 表面上方约 4 cm 处。一个最大功率为 800 W 的加热器被安放在容器上方, 用以模拟太阳辐射。由于盐水 (或沙子) 表面空气和周围的空气之间存在有温差, 各部分空气受热不均会产生气体的对流, 从而形成大气湍流。虽然上述实验平台中光束的传输距离较短, 也没有考虑海岸风的影响, 不能够完全模拟真实的海洋环境, 但是仍然可以比较激光束在盐水和沙子表面上方传输时的差异, 研究 AO 系统对波前畸变校正的作用。结果可以为真实海洋环境中激光束波前校正打下基础。

PDM 的共振频率是 1 kHz, 由计算机 (Dell Precision T3500) 通过数模转换器和一个 40 通道高压放大器 (HVA) 进行控制。数模转换器 (DAC-40-USB, OKOTech, 荷兰) 通过 USB 和计算机相连, 有 40 个输出通道。每个通道都能产生 0~5 V 的电压,

输出的分辨率为 12 bit。电压放大器的放大倍数为 80, 输出电压的范围为 0~300 V, -3 dB 带宽为 1 kHz。S-H WFS 由一组微透镜构成。每个微透镜将入射光线聚成一点投射在相机 C1 的图像传感器上。微透镜阵列平面与 PDM 的反射面位置共轭。参考图 3, “.” 为光线经微透镜聚焦形成的点。光束的波前畸变会导致光点偏离中心位置 (即微透镜焦点, 图 3 中的 “+” 所示)。通过计算点的位移, 可以得到取样点的波前畸变的斜率, 经过波前重建后得到波前畸变。S-H WFS 中的微透镜是正交分布的。相邻微透镜的间距为 0.15 mm, 焦距为 18 mm。相机 C1 (ASI035MM, ZWOptical, 中国) 拍摄光点图像, 并通过 USB 导入计算机。每一幅图经过算法处理后, 得到每个点的位移, 用于实时反馈控制。相机 C1 的闭环取样速率为 60 fps, 图像分辨率为 400 pixel $\times$ 400 pixel (每个像素大小为 6 μm), 8 位。

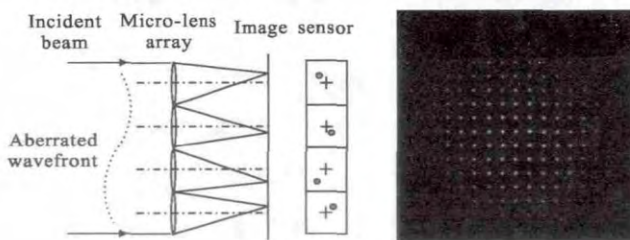


图 3 S-H WFS 的工作原理和相机 C1 获得的图片

Fig.3 Working principle of the S-H WFS and image captured by camera C1 behind the microlenses

2 闭环 AO 系统控制器

参考文中第 1 部分所提及的实验装置, 闭环 AO 系统的控制结构框图如图 4 所示。

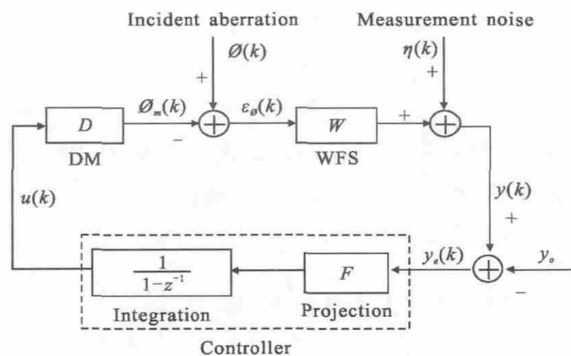


图 4 闭环 AO 系统的框图

Fig.4 Block diagram of the closed-loop AO system

入射激光束的波前畸变在离散时间常数 k 下表

示为 $\phi(k) \in R^{n_f}$, n_f 是离散波前畸变的维数。PDM 的波前调整量表示为 $\phi_m(k) \in R^{n_f}$, 由于闭环 AO 系统的取样速率(60 Hz)远小于 PDM 的谐振频率(1 kHz), 故 PDM 被认为是准静态的, 而 $\phi_m(k)$ 也被近似认为是:

$$\phi_m(k) = Du(k) \quad (1)$$

式中: $u(k) \in R^{n_u}$ 为输入 PDM 的控制信号; n_u 为 $u(k)$ 的维数。在区域控制(Zonal Control)模式中; n_u 为 PDM 执行器的个数。在模态控制中, n_u 表示模态数(如 Zernike 模式的个数)。矩阵 $D \in R^{n_f \times n_u}$ 代表的是控制信号 $u(k)$ 至 PDM 波前调整量的变换。

激光束中残余的波前畸变 $\varepsilon_\phi(k) \in R^{n_f}$ 可以表示为:

$$\varepsilon_\phi(k) = \phi(k) - \phi_m(k) \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_\phi(k) \in R^{n_f}$ 表示波前畸变余量。把相机 C1 采集图像中点的坐标表示为 $y(k) \in R^{n_y}$, (向量 $y(k)$ 同时包含了点的横纵坐标), $y(k)$ 与波前畸变 $\varepsilon_\phi(k)$ 的关系可以表示为:

$$y(k) = z^{-d}(W\varepsilon_\phi(k) + \eta(k)) \quad (3)$$

式中: z 为位移算子, 整数 d 是波前测量中的采样延迟。由于数控系统中的固有延迟, 因此 $d \geq 1$ 。矩阵 $W \in R^{n_y \times n_f}$, 也被称为 S-H WFS 的几何矩阵, 表示从波前畸变到点位移的线性变换。 $\eta(k)$ 是测量噪声。记 $y_0 \in R^{n_y}$ 为初始参考点的坐标。忽略干扰项 $\eta(k)$, 则点的位置残差 $y_e(k)$ 和波前畸变可以线性近似为:

$$y_e(k) = y(k) - y_0 \approx z^{-d}W\varepsilon_\phi(k) - y_0 \quad (4)$$

合并公式(1), (2)和(4), 位置残差可以写成:

$$y_e(k) \approx z^{-d}W(\phi(k) - Du(k)) - y_0 \quad (5)$$

根据公式(5), 在 $\phi(k)=0, y_0=0$ 的情况下, 从控制信号 $u(k)$ 到 $y_e(k)$ 的开环传递函数可以表示为:

$$y_e(k) \approx -\frac{WD}{M}u(k)z^{-d} \quad (6)$$

式中: $M = WD \in R^{n_y \times n_u}$ 表示从控制信号 $u(k)$ 到位置残差 $y_e(k)$ 的线性映射。为了使得位置残差 y_e 的方差最小, 控制信号 $u(k)$ 由下式产生:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\mu(\hat{M}^T \hat{M} + \rho I)^{-1} \hat{M}^T}{F} y_e(k) \quad (7)$$

矩阵 $F \in R^{n_u \times n_u}$ 将点的位移残差 y_e 映射到控制信号 $u(k)$ 的空间。矩阵 $\hat{M} \in R^{n_y \times n_u}$ 是公式(6)中矩阵 M 的估计值, 可由系统辨识获得。 $\hat{M}$ 的广义逆矩阵为 $(\hat{M}^T \hat{M})^{-1} \hat{M}^T$ 。

如果矩阵 $\hat{M}$ 存在非常小的奇异值或是病态矩阵, 那么对矩阵 $\hat{M}^T \hat{M}$ 直接求逆会使得控制信号的幅度过大, 容易引起闭环系统饱和。因此需要引入一个正则化因子 $\rho \in R$, 来减少矩阵中小奇异值的影响, 从而提高闭环 AO 系统的鲁棒性。因子 ρ 的值可以人为调整, 通常 $\rho \geq 0$ 。 $I \in R^{n_y \times n_y}$ 是单位矩阵。参数 $\mu \in R$ 也是人为定义的正数, 用以平衡闭环 AO 系统的性能和稳定性。

将公式(5)、(6)代入公式(7), 控制信号 $u(k)$ 表示为:

$$u(k) = u(k-1) + Fz^{-d}W\phi(k) - Fz^{-d}Wu(k) = (I - z^{1-d}FM) \cdot u(k-1) + Fz^{-d}W\phi(k) \quad (8)$$

为了确保闭环 AO 系统的稳定性, 矩阵 $Q = I - z^{1-d}FM \in R^{n_u \times n_u}$ 的特征值应该在单位圆中。假设闭环系统中只有一个采样延迟 (即 $d=1$), 并且忽略矩阵的不确定性 (即 $\hat{M}=M$), 那么闭环系统稳定性的分析情况如下。

通过奇异值分解(SVD)^[21], 矩阵 $M \in R^{n_y \times n_u}$ 可以被分解为:

$$M = USV^T \quad (9)$$

式中: $U \in R^{n_y \times n_y}$ 和 $V \in R^{n_u \times n_u}$ 为单位正交阵, 满足 $UU^T = I, VV^T = I$, 奇异值矩阵 $S \in R^{n_y \times n_u}$ 的形式为:

$$S = [\text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_{n_u}) \quad 0_{n_y - n_u \times n_u}]^T \quad (10)$$

式中: 奇异值 $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_{n_u} > 0$ 。因此矩阵 Q 可以被分解为:

$$Q = I - \mu(M^T M + \rho I)^{-1} M^T M = I - \mu(V \cdot \text{diag}(s_1^2 + \rho, s_2^2 + \rho, \dots, s_{n_u}^2 + \rho) \cdot V^T)^{-1} \cdot V \cdot \text{diag}(s_1^2, s_2^2, \dots, s_{n_u}^2) \cdot V^T \quad (11)$$

公式(11)即为矩阵 Q 特征值分解的形式, Q 的

特征值为 $1 - \frac{\mu s_i^2}{s_i^2 + \rho}, i=1, 2, \dots, n_u$ 。

为了保证 Q 的所有特征值都在单位圆中, 则应该满足下式条件:

$$\left| 1 - \frac{\mu s_i^2}{s_i^2 + \rho} \right| \leq 1 \quad (12)$$

系数 μ 对所有的 $i=1, 2, \dots, n_u$ 应当满足:

$$\mu \in \left[0, 2 + \frac{2\rho}{s_i^2} \right] \quad (13)$$

在实际情况下, 辨识得到的矩阵 $\hat{M}$ 和真实值 M 之间总是存在差异, 模型总是存在不确定性。为了更好地协调闭环 AO 系统的性能和稳定性, 系数 μ 和 ρ 需要通过调整, 使得点位移残差的方差最小。

3 实验和结果分析

实验平台如图 1、图 2 所示。实验内容主要包括自适应光学系统建模、激光束波前畸变的特性化(开环), 以及通过闭环 AO 系统对光束波前畸变进行校正。

3.1 自适应光学系统建模

由公式(7)可以看出, 在控制器设计的过程中, 需要使用自适应光学系统模型 $\hat{M}$, 对应的是从控制信号 $u(k)$ 到位置残差 $y_e(k)$ 的映射。

由于激光束的直径较小, 只选择 PDM 中心附近的 19 个执行器进行畸变校正, 即 $n_a=19$ 。在建模的过程中, 为了对系统充分激励, 在 19 个执行器上同时施加随机控制信号 $u(k), k=1, 2, \dots, 500$, 并同步采集波前传感器点坐标 $y(k)$ 。随机信号预先设定, 信号幅度在 1~4 V 之间。相机的采样频率为 60 fps, 点位移 $y_e(k)$ 通过公式 $y_e(k)=y(k)-y_0$ 计算得到, 式中参考值 y_0 为空气中没有扰动时光点的初始位置。由于 WFS 图像中光点的个数远大于执行器个数, 因此 AO 系统是超定的。为了减少图像处理算法和控制器的复杂性, 最终选择了 38 路输出(即 $n_y=38$)用于建模和后续的反馈控制器设计。这 38 路输出对于 PDM 中心 19 个执行器的变形均有明显的反应, 具有较高的信噪比, 而且对于每个执行器都有对应的输出信号与之匹配。

在采集 $y(k)$ 时, 共采集了 500 个时间点的样本, 其中 250 个用于辨识矩阵 $\hat{M}$, 剩余的 250 个用于模型测试。矩阵辨识的过程中, 使用最小二乘法拟合 $u(k)$ 和 $y_e(k)$ 间的矩阵 M , 使得 $|y_e(k)-\hat{M}u(k)|$ 最小。并通过计算矩阵的方差贡献(VAF)来计算估计矩阵 $\hat{M}$ 的精确性。VAF 定义如下:

$$\text{VAF}(\hat{y}_e, y_e) = \left(1 - \frac{\text{var}(\hat{y}_e - y_e)}{\text{var}(y_e)} \right) \times 100\% \quad (14)$$

式中: $\text{var}(y_e)$ 指的是 y_e 的方差。 $\text{VAF}(\hat{y}_e, y_e)$ 的范围从 $-\infty$ 到 100%。采用测试数据对 $\hat{M}$ 的精确度进行测试, 矩阵 $\hat{M}$ 的 VAF 在 38 个输出通道中的平均值为 81.5%,

意味着矩阵 $\hat{M}$ 能够精确地模拟 $u(k)$ 和 $y_e(k)$ 的开环传递关系。

3.2 波前畸变校正

在激光传输的过程中, 其波前畸变的特性受到诸多因素的影响, 如下垫面材料、加热时间、光束的直径、波长、环境风速、激光与下垫面距离等。在实验中, 采用盐水和沙子两种下垫面材料, 对比自适应光学系统对光束波前畸变的校正效果。

图 5 所示为加热不同时间, 下垫面表面的温度变化。从图中可以明显看出, 沙子表面的温度变化比盐水表面的温度变化更剧烈。加热 30 min 以后, 沙子表面的温度由开始的 28 °C 升至约 57 °C (温度变化为 29 °C), 而盐水表面的温度仅仅升至 34 °C (温度变化为 6 °C)。产生这一温度差异的主要原因在于: (1) 沙子的比热容为 1 100 J/(kg·°C), 约为盐水(4 096 J/(kg·°C)) 的四分之一, 在表面同等辐射受热情况下, 沙子的温升更大; (2) 盐水的导热系数约为 0.62 W/(m·K), 高于沙子的导热系数 0.27 W/(m·K), 因此盐水更容易把热传递到低温处; (3) 由于沙子仅有表层受热, 不像盐水那样具有流动性, 也会造成沙子的温度上升情况会比盐水更加明显。因此可以预见沙子上方的大气湍流比盐水上方向更剧烈。

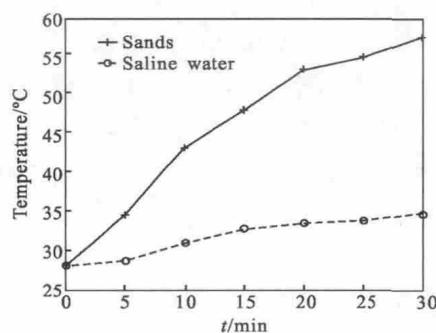


图 5 两种材料的温度随时间变化曲线

Fig.5 Temperature variation curves for two materials

图 6 所示为加热 30 min 后, y_e 的 38 个输出通道的平均功率谱密度(PSD)。充分反映了波前畸变的变化特性。从图中可以看到当激光束在盐水上方向传输时, 光点位移的 PSD 曲线始终低于沙子情况下的曲线。显示了激光在沙子上方传输时, 大气湍流对光束波前的影响比光束在盐水上方向传输时更严重。这一结果与图 5 的温度测量结果相一致。

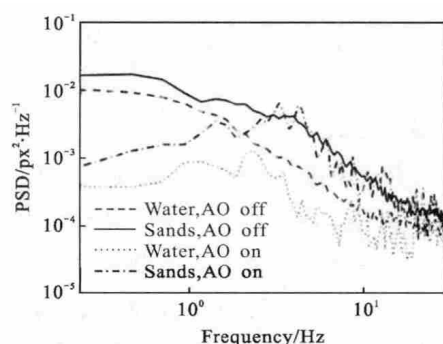


图 6 在 AO 系统启用和关闭状态下盐水和沙子上各自的点位移能量谱密度

Fig.6 Power spectrum density of the spots displacement for saline water and sands, with AO off and on

在采用闭环自适应光学系统进行波前畸变校正时, S-HWFS 的测量数据被送入控制器中, 控制信号 $u(k)$ 根据公式(7)实时计算得到。相机 C1 的闭环采样速率为 60 fps。系数 μ 和 ρ 的整定通过使得点位移 y_e 的方差最小来实现。

当激光束在盐水上方向传输时, 光点位置残差的均方差为 $0.65 \mu\text{m}^2$, 通过闭环 AO 系统的校正, 该数值降低为 0.49 , 减少了 28%。而光束在沙子上方向传输时, 均方差从 $1.7 \mu\text{m}^2$ 减小至 $1.5 \mu\text{m}^2$, 减少了 12%。从图 6 的功率谱密度中可以看到, 在频率低于 1 Hz 时, 盐水和沙子上的能量密度都减少了大约一个数量级。随着波前畸变变化频率的增加, 校正的作用减弱。这显示了实验平台的闭环 AO 系统对低频率的波前畸变有显著的校正效果, 但为了在高频段取得较好的畸变校正效果, 闭环 AO 系统的采样速率需要提高, 这也是下一步工作之一。

4 结 论

在实验室条件下, 对在盐水和沙子上方向传输的激光束的波前畸变进行了对比研究, 并采用了闭环 AO 系统对波前畸变进行了校正。

结果显示由于水沙比热容、导热性、流动性的区别, 同等辐射条件下, 沙子表面的温度变化比盐水表面温度变化更剧烈。当激光束在加热的沙子上方向传输时, 其波前畸变比在加热的盐水上方向传输时更为显著。采用闭环自适应光学系统可在一定程度上对光束的波前畸变进行较好地校正。在闭环 AO 系统运行时, 沙子上点位移的方差减少了 12%, 而盐水上

点位移的方差减少了 28%。

实验装置仅仅模拟了温差对波前的影响, 而自然海洋环境中风的影响是不可忽视的。因此在未来的工作中将考虑真实海洋环境下光束传输的特性及自适应光学系统的校正效果。

参考文献:

- [1] Majumdar A K, Ricklin J C. Free-space Laser Communications: Principles and Advances [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [2] Yang Huizheng, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Applications of adaptive optics technology in atmospheric laser communications system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(10): 61-68. (in Chinese)
- [3] Andrews L C, Phillips R L. Laser Beam Propagation Through Random Media[M]. Bellingham, WA: SPIE Press, 2005.
- [4] Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Theory of Adaptive Optics[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [5] Yura H T, McKinley W G. Optical scintillation statistics for IR ground-to-space laser communication systems[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(21): 3353-3358.
- [6] Andrews L C, Phillips R L, Yu P T. Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(33): 7742-7751.
- [7] Miller W B, Andrews L C, Ricklin J C. Effects of the refractive index spectral model on the irradiance variance of a Gaussian beam[J]. *JOSA A*, 1994, 11(10): 2719-2726.
- [8] Tyson R K. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications[J]. *JOSA A*, 2002, 19(4): 753-758.
- [9] Friehe C A, La Rue J C, Champagne F H, et al. Effects of temperature and humidity fluctuations on the optical refractive index in the marine boundary layer [J]. *JOSA*, 1975, 65(12): 1502-1511.
- [10] Sun Chuanrong, Tao Shuwang, Luo Yong. Land-sea breeze and the application of wind profile in the wind speed forecasting to wind farm along the coast[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(3): 630-636. (in Chinese)

孙川永, 陶树旺, 罗勇, 等. 海陆风及沿海风速廓线在风电场风速预报中的应用 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(3):

- 630-636.
- [11] Cai Rongshuo, Yan Bangliang, Huang Ronghui. A numerical model and its simulation of the land and sea breeze over the Taiwan Strait [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 727(1): 86-96. (in Chinese)
蔡榕硕, 严邦良, 黄荣辉. 台湾海峡海陆风数值模式与数值模拟试验[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 86-96.
- [12] Liu Jingxiong, Tang Wenwei, Zhu Chize. Discussion on calculation method of strong wind velocity on Zhejiang-Fujian coasts and Taiwan Strait in winter [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2004, 23(1): 8-13. (in Chinese)
刘京雄, 唐文伟, 朱持则, 等. 浙闽沿海和台湾海峡海域冬季大风风速计算方法探讨 [J]. 应用海洋学学报, 2004, 23(1): 8-13.
- [13] Vetelino F S, Grayshan K, Young C Y. Inferring path average CN2 values in the marine environment [J]. *JOSA A*, 2007, 24(10): 3198-3206.
- [14] Wasiczko L M, Moore C I, Burris H R, et al. Characterization of the marine atmosphere for free-space optical communication[C]//Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics, 2006: 621501-621501-12.
- [15] Ma Xiaoshan, Zhu Wengyue, Rao Ruizhong. Anisotropy of beam wander of focused beam in atmospheric boundary layer above sea level [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(6): 922-926. (in Chinese)
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 海面大气边界层中聚焦光束漂移各向异性的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 922-926.
- [16] Sergeyev A V, Roggemann M C. Monitoring the statistics of turbulence: Fried parameter estimation from the wavefront sensor measurements [J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (20): 3519-3528.
- [17] Levine B M, Martinsen E A, Wirth A, et al. Horizontal line-of-sight turbulence over near-ground paths and implications for adaptive optics corrections in laser communications [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(21): 4553-4560.
- [18] Liu Chao, Hu Lifa, Mu Quanquan. Bandwidth requirements of adaptive optical system for horizontal turbulence correction [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2137-2142. (in Chinese)
刘超, 胡立发, 穆全全, 等. 校正水平湍流波面的自适应光学系统的带宽需求 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2137-2142.
- [19] Hinnen K, Verhaegen M, Doelman N. Exploiting the spatiotemporal correlation in adaptive optics using data-driven H2-optimal control[J]. *JOSAA*, 2007, 24(6): 1714-1725.
- [20] Paschall R N, Anderson D J. Linear quadratic Gaussian control of a deformable mirror adaptive optics system with time-delayed measurements [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(31): 6347-6358.
- [21] Golub G H, Van Loan C F. *Matrix Computations* [M]. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1996: 374-426.
- [22] Verhaegen M, Verdult V. Filtering and system identification; A least squares approach [J]. *Signal Processing IEEE Transactions on*, 2011, 40(10): 2433-2458.