

光学学报

基于 MAD 光流计算近地面大气光学湍流参数

郭一鸣^{1,2,3}, 吴晓庆^{1,3*}, 青春^{1,3}, 刘庆^{1,3}, 王志远^{1,3}, 杨期科^{1,2,3}, 胡晓丹^{1,2,3}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 提出一种基于绝对中位值偏差(MAD)的光流计算方法,并用于计算近地面大气湍流折射率结构常数 C_n^2 。通过光流计算捕捉望远镜系统拍摄的前后多帧目标图像的抖动信息,得到传输路径上的到达角起伏方差均值,从而估算近地面大气湍流折射率结构常数。通过在合肥市进行了为期6天的观测实验,将模型估计的 C_n^2 均值与观测路径上温度脉动仪的实测结果进行充分对比,最终得到估算值与实测值的平均偏差(BIAS)、方均根误差(RMSE)、相关系数分别为-0.0202、0.2391、0.8230,充分证明所提方法可以有效估算近地面大气湍流折射率结构常数,为基于图像反演大气湍流参数提供参考。

关键词 大气光学; MAD光流计算; 湍流; 到达角起伏方差; 大气湍流折射率结构常数

中图分类号 O435.1; TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2401006

Calculation of Near-Surface Atmospheric Optical Turbulence Parameter Based on MAD Optical Flow

Guo Yiming^{1,2,3}, Wu Xiaoqing^{1,3*}, Qing Chun^{1,3}, Liu Qing^{1,3}, Wang Zhiyuan^{1,3}, Yang Qike^{1,2,3}, Hu Xiaodan^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China

Abstract An optical flow calculation method is proposed based on median absolute deviation (MAD) to estimate the refractive index structure constant of near-surface atmospheric turbulence, namely, C_n^2 . Specifically, this paper captures the jitter information of adjacent target images with multiple frames shot by a telescopic system through optical flow calculation and obtains the mean value of the angle-of-arrival fluctuation variance on the transmission path, so as to estimate the refractive index structure constant of near-surface atmospheric turbulence. Subsequently, a 6-day observation experiment is carried out in Hefei, and the mean value of C_n^2 estimated by the model is comprehensively compared with the results measured by a micro-temperature sensor on the observation path. As a result, in terms of estimated and measured values, the mean deviation (BIAS), root-mean-square error (RMSE), and correlation coefficients are -0.0202, 0.2391, and 0.8230, respectively. Therefore, it is fully proved that the proposed method can effectively estimate the refractive index structure constant of near-surface atmospheric turbulence and provide reference for the inversion of atmospheric turbulence parameters based on images.

Key words atmospheric optics; MAD optical flow calculation; turbulence; angle-of-arrival fluctuation variance; refractive index structure constant of atmospheric turbulence

收稿日期: 2022-04-28; 修回日期: 2022-06-20; 录用日期: 2022-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(91752103)、先进激光技术安徽省实验室基金青年项目(AHL2021QN02)

通信作者: *xqwu@aiofm.ac.cn

1 引言

大气光学湍流对于远距离成像以及光电系统性能具有重要影响^[1-2],这主要是因为大气光学湍流强度在时间与空间上具有随机性和不稳定性。因此,大气光学湍流会导致光线折射率随机起伏,得到的图像不仅包含模糊,还具有一定程度的畸变效应。同时,大气光学湍流还会导致光束传播质量下降,以及伴随着光强闪烁、光束扩展等湍流效应^[3-4],严重影响激光发射与接收系统的正常使用。因此,研究大气光学湍流强度特性具有十分重要的科学意义。

通常,大气光学湍流强度特性可以使用大气湍流折射率结构常数 C_n^2 表征,通过对该参数的测量与估算可以较为准确地反映大气光学湍流强度的变化趋势。目前,许多国外学者对此展开了深入研究: Sarazin 等^[5]使用差分图像理论来估算恒星视宁度; Whiteley 等^[6]利用差分斜程测量技术来测量大气湍流折射率结构常数 C_n^2 ; 爱尔兰国立大学基于 250 mm 口径的望远镜开发出单星闪烁仪系统 (SSS), 利用单个星源的闪烁效应探测大气湍流特征^[7]。国内方面,利用湍流气象探空仪获取探空数据进而分析大气湍流特性成为一种常用的测量手段。例如: 韩亚娟等^[8]采用探空数据拟合得到的符合拉萨湍流特征的 C_n^2 经验模式,可以有效估算拉萨昼夜的湍流强度; 毕翠翠等^[9]利用三亚实测的探空数据对基于遗传算法的反向传播 (GA-BP) 神经网络进行预训练,并对近海地区高空大气光学湍流廓线进行有效估算。但上述方法中,由于 C_n^2 并不是常规的观测参数,因此上述方法均需要搭建专门的硬件系统进行测量,同时观测结果会受到诸多地域以及环境因素的影响。近年来,通过直接拍摄图像来反演大气湍流参数成为一种新的研究方法。2017 年,美国空军理工学院 (AFIT) 提出了通过延时成像算法来估计沿光路传播路径上的湍流强度信息,并对此进行了持续深入的研究^[10-11]。2021 年,密歇根理工大学通过使用多帧盲反卷积

(MFBFD) 算法来分析大气湍流特性^[12]。然而,上述方法虽具有一定的开拓意义,但实验设置较为复杂,在具体应用中可能需要沿两条不同路径来捕获图像。

本文提出一种基于中位值偏差 (MAD) 光流计算近地面大气光学湍流参数的方法,首先利用光学望远镜系统观测 1 km 靶点 (楼房) 的多帧湍流退化图像。根据图像相邻帧间的抖动信息,利用所提出的光流计算方法计算对应的到达角起伏方差。然后,引入 MAD 算法剔除不合理的离群值,进而求取当前时段内到达角起伏方差的均值,并计算沿光路传输路径的大气湍流折射率结构常数 C_n^2 。与传统的差分像运动测量法 (DIMM) 相比^[13-15],本文方法所需的硬件平台较为简单,只需要一台卡塞格林望远镜即可进行实验,并且不需要设置信标光源,依赖自然光拍摄的图像即可完成大气湍流参数估算。同时,利用实验室的温度脉动仪实时测量当前路径的大气湍流折射率结构常数,将其和所提模型的输出结果进行比较,并采用相关统计指标进行客观评价,检验所提算法的反演效果。

2 研究方法

2.1 光流计算原理

对光流的研究起源于 20 世纪 50 年代,最早由心理学家 Prentice 和 Gibson^[16]提出。光流用于表示物体连续变化的信息在人眼视网膜前不断流过,通过光流计算可以反映空间运动物体在观察成像平面上像素运动的瞬时速度。1976 年,Reichardt 和 Poggio^[17]在研究昆虫运动时,提出了关于光流计算的粗略形式。1981 年,Lucas 等^[18]为二维速度场与灰度建立联系,并相继提出光流计算的约束方程。目前,常见的光流计算方法主要包括稀疏光流计算方法和稠密光流计算方法,考虑到实际湍流退化图像中,相邻图像帧间的抖动信息主要集中在图像的特征点与角点。因此,本文采用的光流计算方法为稀疏光流计算,稀疏光流计算流程如图 1 所示。

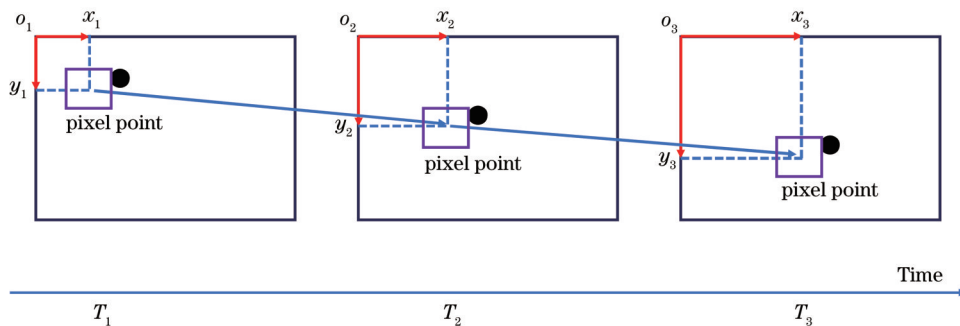


图 1 稀疏光流计算方法跟踪同一个像素点在不同时刻的位置

Fig. 1 Sparse optical flow calculation to track the position of the same pixel point at different times

光流计算的约束条件主要包括:亮度恒定不变;时间连续或运动为“小运动”。

部分约束表达式为

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt), \quad (1)$$

式中: $I(x, y, t)$ 为图像中某一个像素点 (x, y, t) 在第

一帧图像的光强度; t 为时间。它移动了 (dx, dy) 的距离到下一帧图像,使用了 dt 时间。由于满足前述约束条件,该像素点在运动前后的光强度是不变的。对式 (1) 右端进行泰勒展开,可得

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} dx + \frac{\partial I}{\partial y} dy + \frac{\partial I}{\partial t} dt + \epsilon, \quad (2)$$

式中: ϵ 表示二阶无穷小项, 可以忽略不计。将式(2)代入式(1)并同除以 dt 得到

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

令 $u = \frac{dx}{dt}$ 、 $v = \frac{dy}{dt}$, 其中 u 、 v 分别为光流沿 x 轴、 y

轴的速度, $I_x = \frac{\partial I}{\partial x}$ 、 $I_y = \frac{\partial I}{\partial y}$ 、 $I_t = \frac{\partial I}{\partial t}$ 分别表示图像中像素点的灰度对 x 、 y 、 t 的偏导数。因此, 式(3)可写为

$$I_x u + I_y v + I_t = 0. \quad (4)$$

I_x 、 I_y 、 I_t 均可从图像数据中求得, 方程中的 (u, v) 即为所求的光流矢量。

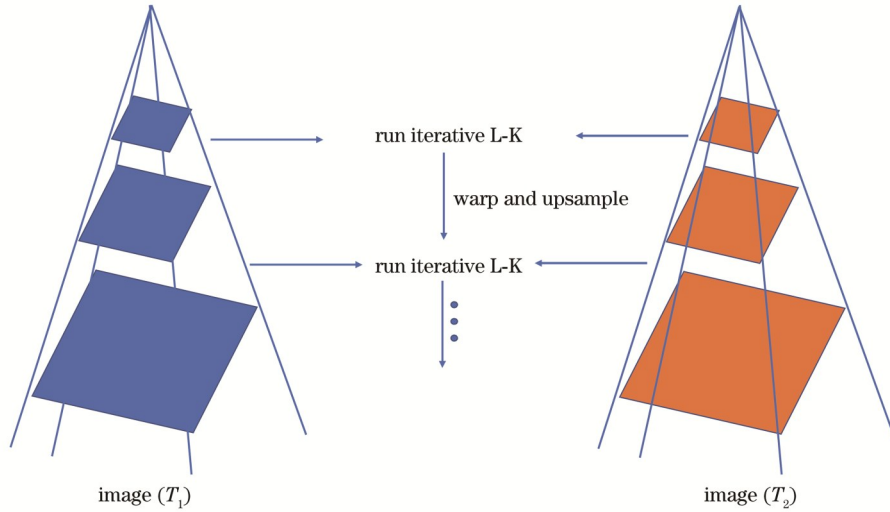


图 2 金字塔光流计算示意图

Fig. 2 Schematic of pyramid optical flow calculation

上述计算过程中, 通过计算同一个像素点在相邻两帧图像的光流矢量, 得到前后两帧图像中该像素点的位移, 记为 Δw_i , 可表示为

$$\Delta w_i = \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2}, \quad (5)$$

$$\alpha_i = \Delta w_i \cdot p / f, \quad (6)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_i + \dots + \alpha_n}{n} \quad (i \geq 1, n > i), \quad (7)$$

$$\delta_\alpha^2 = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2 / n, \quad (8)$$

式中: x_i 与 x'_i 分别表示同一个像素点 i 在前一帧与后一帧图像上的横坐标; y_i 与 y'_i 分别表示同一个像素点 i 在前一帧与后一帧图像上的纵坐标; α_i 表示到达角, 表征光束在传播过程中受大气影响产生的波前畸变, 从而使得接收孔径前端的整体波前倾斜角 α_i 发生变化, 这个变化即为到达角起伏, 这将导致成像的像素点发生偏离; p 为望远镜系统中相机的像元大小; f 为相机的

本文主要采用改进的 Lucas-Kanada (L-K) 金字塔光流计算方法来估计近地面大气湍流参数。L-K 光流计算方法是由 Lucas 和 Kanade^[18] 提出, 它是一种基于两帧图像差分的稀疏光流计算方法, 其需要处理的像素点数量较少、耗时短。由于 L-K 光流计算方法除了具有光流计算的两个约束条件外, 同时还要求两帧图像的区域一致, 这在通常情况下并不容易满足。因此, 可以通过添加图像金字塔来改善 L-K 计算方法的跟踪精度。

图 2 为金字塔光流计算示意图, 其中 $\text{image}(T_1)$ 表示 T_1 时刻的目标图像, $\text{image}(T_2)$ 表示 T_2 时刻的目标图像。 T_1 与 T_2 的时间间隔由相机的采样频率决定。随着上述金字塔层数下降, 图像分辨率逐渐降低。同时, 采用分层计算 L-K 算法可以极大减少对于大量光流运动时产生数据的运算量, 减小运算复杂度。最终, 通过重复迭代计算, 可以得到最终的光流计算结果。

焦距, 根据到达角公式可得到像素点 i 对应的到达角起伏^[19]; $\bar{\alpha}$ 表示该相邻两帧图像多个像素点到达角起伏的均值, 结合式(8)可得到其对应的到达角起伏方差 δ_α^2 。因此, 可通过式(5)计算像素点 i 的光流。由于相邻两帧图像会捕捉多个像素点计算它们对应的光流, 通过式(6)可得到该相邻两帧图像的多个到达角。将水平路径上湍流强度视为均匀分布, 则平面波到达角起伏方差与大气湍流折射率结构常数 C_n^2 ^[20] 可以表示为

$$C_n^2 = \left(0.3436 \times D^{\frac{1}{3}} \times \delta_\alpha^2 \right) / L, \quad (9)$$

式中: D 为望远镜系统口径; L 为望远镜系统与观测目标的水平距离。利用式(9)可以计算指定的相邻两帧图像对应的大气湍流折射率结构常数。

2.2 MAD 剔除离群值

由于通过 L-K 光流计算到达角起伏方差不可避免地会出现超出正常范围的离群值, 这会极大地影响大气湍流参数估算的精确度。为了尽可能排除这些离群

值的干扰,在上述光流计算中引入 MAD 处理^[21]。MAD 算法的具体执行过程如下:

- 1) 计算所有估算值的中位数 X_{median} ;
- 2) 计算每个估算值与中位数的绝对偏差值 $\sigma = |X_i - X_{\text{median}}|$, 其中 X_i 为第 i 个估算值;
- 3) 获得绝对偏差的中位值 $X_{\text{MAD}} = \sigma_{\text{median}}$, σ_{median} 表示绝对偏差的中位值;
- 4) 确定参数 n , 保留原有估算值中 X_i (如果

$$X_{\text{median}} - n \times X_{\text{MAD}} < X_i < X_{\text{median}} + n \times X_{\text{MAD}}).$$

MAD 算法结构中,需要选择合适的参数 n , 根据拉依达准则,通常默认为 3^[22]。对于超出设定阈值范围的光流估计值,模型即认定其为离群值,会自动剔除,以避免影响大气湍流折射率结构常数的估算精度。图 3 所示为利用 MAD 算法对 2022 年 3 月 27 日 16 时 8 分的观测图像剔除离群值前后的折射率结构常数估算结果分布。

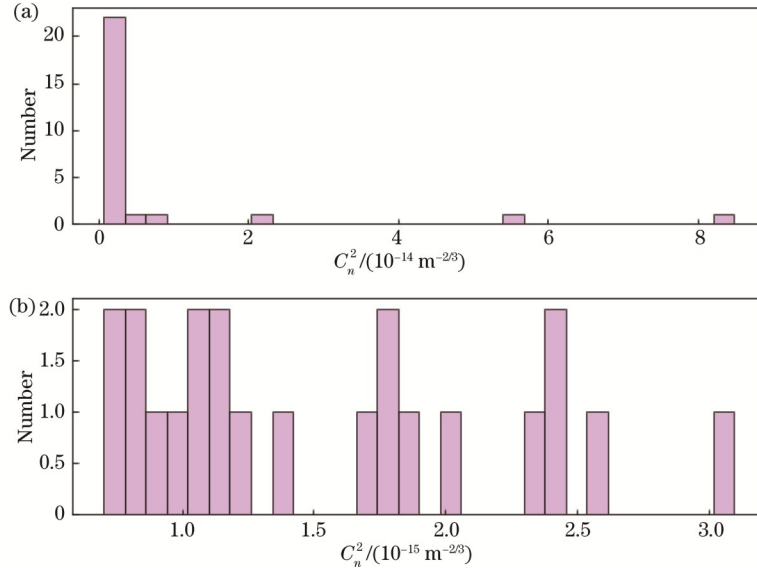


图 3 MAD 算法剔除离群值前后数据分布。(a) MAD 使用前;(b) MAD 使用后

Fig. 3 Data distribution before and after MAD algorithm removes outliers. (a) Before using MAD; (b) after using MAD

图 3 中,横坐标分别表示当前时刻光流计算的若干估计结果,纵坐标表示在相应区间的取值数量。从图 3(a)可知,绝大多数折射率结构常数估计值都位于 $10^{-16} \sim 10^{-15}$ 范围,仅有 3 个值位于 10^{-14} 量级区间,因此 MAD 算法会将这 3 个值对应的到达角起伏方差判定为离群值并自动剔除。图 3(b)所示为经过 MAD 处理后的算法估计值分布。通过计算可知,MAD 处理前该时刻的 $\lg C_n^2$ 均值为 -14.11245 , MAD 处理后的 $\lg C_n^2$ 均值为 -14.71141 ,而温度脉动仪当前时刻的实测值为 -14.56371 ,因此采用 MAD 对光流计算进行预处理可以提高模型的估算精度。

2.3 基于 MAD 光流计算的执行过程

图 4 具体展示了 MAD 光流计算某一时刻大气湍流折射率结构常数的过程,主要包括:1) 获取当前图像的帧序号;2) 当判断图像不是拍摄时刻的最后一帧图像时,计算当前帧与下一帧图像的光流;3) 通过得到的光流值计算对应的到达角起伏方差;4) 利用 MAD 筛选合理的到达角起伏方差值,代入式(9)得到这两帧图像对应的大气湍流折射率结构常数;5) 当判断图像为最后一帧图像时,对之前计算的所有折射率结构常数求取均值,并将其作为当前时刻大气湍流参数的估计值。通过对算法的连续执行,可以绘制所有观测时段的大气湍流变化趋势曲线。

3 实验数据采集

3.1 实验环境概况

本实验的地点位于安徽省合肥市 ($117^{\circ}9'48''\text{E}$, $31^{\circ}54'16''\text{N}$, 平均海拔 40 m)。实验时间为 2022 年 3 月,选择晴朗无云的天气进行实验。在本文的观测实验中,利用位于 5 楼(距离地面约 16 m)的室内窗口的望远镜系统水平拍摄 1 km 外的目标靶点建筑,将温度脉动仪放置在水平测量路径上距离望远镜系统 100 m 左右的室外楼顶并实时采集该路径上的风向、风速、温度、大气压力、气压附温、相对湿度等数据,结合式(11)可以实时计算出大气折射率结构常数 (C_n^2),此时利用望远镜系统同步采集 1 km 目标靶点的图像。由于望远镜系统每隔 3 min 采集一次目标靶点图像,每次采集时间为 30 s 左右,而实验使用的温度脉动仪每隔 5 s 测量一组数据,因此在实验过程中,温度脉动仪采集数据的时间分辨率明显高于望远镜系统。为了保证后期对比分析两种数据的时间分辨率相同,对于温度脉动仪采集的时间序列仅保留与望远镜系统相同采样时刻的数据,即两种方法的时间分辨率都是 3 min。每天进行观测实验的时间大致为 8 时至 18 时。观测路径及观测靶点如图 5 和图 6 所示,表 1 列出了具体的观测实验记录。

望远镜系统在拍摄 1 km 靶点图像时,拍摄时间会

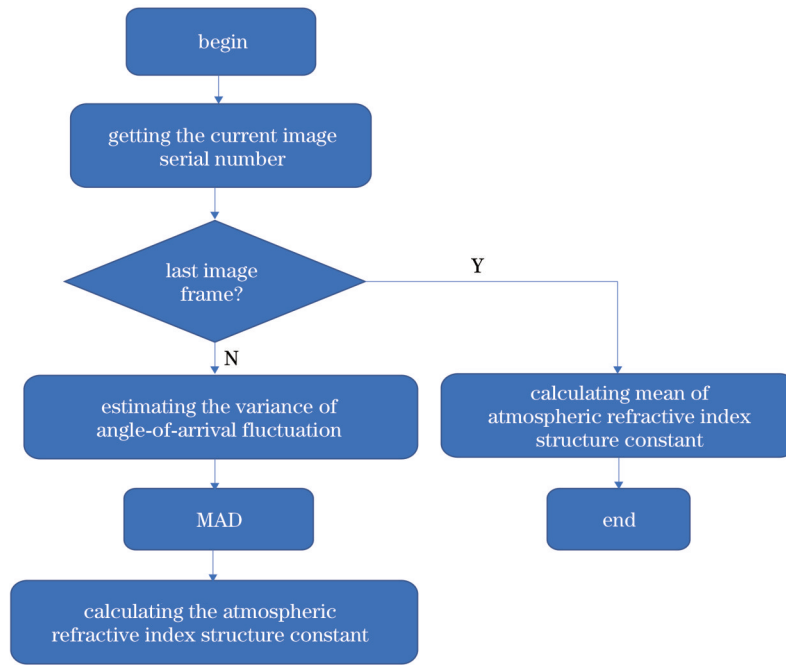


图 4 MAD 光流计算流程图

Fig. 4 Flow chart of MAD optical flow calculation

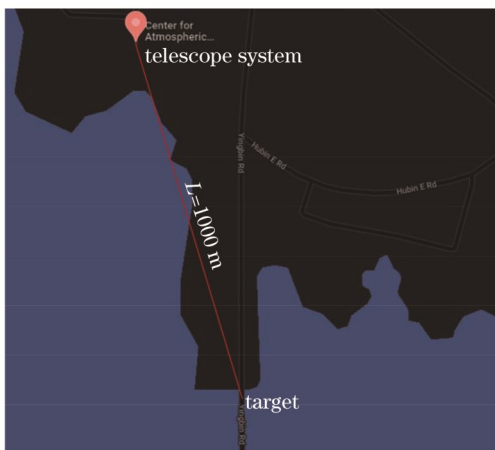


图 5 望远镜系统观测路径

Fig. 5 Observation path of telescope system

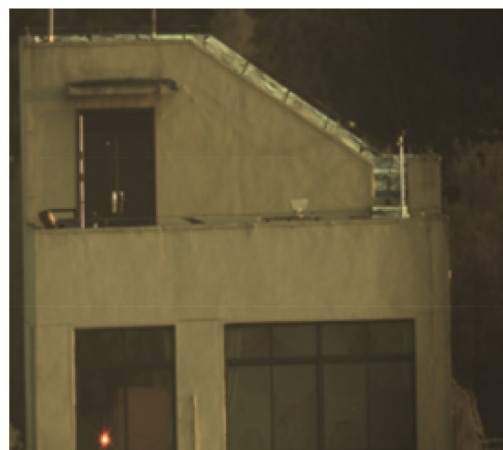


图 6 1 km 目标靶点 (楼房)

Fig. 6 1 km target (building)

根据天气(下雨,多雾等情况)等进行适当调整。表 1 具体展示了从 2022 年 3 月上、下旬拍摄数据中选取的部分有效拍摄数据记录,后续将利用所提算法计算上述几天的大气湍流折射率结构常数,并与温度脉动仪实测值进行对比分析。

3.2 实验设备简介

3.2.1 卡塞格林望远镜系统

利用实验室配备的先进卡塞格林光学望远镜观测系统^[23]对 1 km 靶点进行实时观测。考虑到望远镜系统在拍摄过程中会受到外界风速的抖动影响,导致所估算的湍流抖动信息准确性降低,因此将望远镜系统放置在实验室的室内窗口,尽量减小风速带来的测量误差。望远镜系统及望远镜系统参数分别如图 7 和表 2 所示。

表 1 合肥市近地面实验数据采集记录

Table 1 Data collection records of near-surface experiments in Hefei

No.	Date	Start time	End time	Shooting distance /m
1#	Mar. 5, 2022	09:11	18:10	~1000
2#	Mar. 6, 2022	08:25	18:00	~1000
3#	Mar. 7, 2022	09:16	18:15	~1000
4#	Mar. 8, 2022	09:05	18:15	~1000
5#	Mar. 27, 2022	09:30	18:20	~1000
6#	Mar. 28, 2022	07:55	18:24	~1000

3.2.2 温度脉动仪

为了验证所提算法估算近地面大气光学湍流参数的精度,在拍摄路径上架设温度脉动仪来实时测量传



图 7 卡塞格林光学望远镜系统

Fig. 7 Cassegrain optical telescope system

表 2 卡塞格林望远镜系统的光学参数配置

Table 2 Optical parameters of Cassegrain telescope system

Parameter	Value
Aperture D / mm	304
Focal length f / mm	2432
Object distance L / m	1000
Pixel size p / μm	4.78
Exposure time t / ms	10
Wavelength λ / nm	550

输路径的大气湍流折射率结构常数。对于可见光与近红外波段,折射率的起伏主要受温度影响。根据大气湍流的均匀各向同性理论,温度结构常数 C_T^2 可以通过温度脉动仪的一对微温探头来测量空间两点的温差,

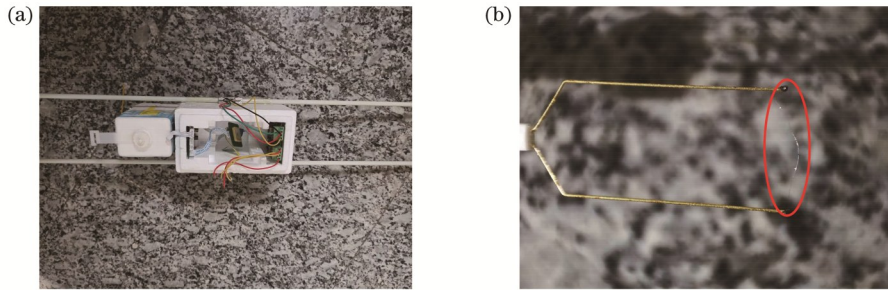


图 8 温度脉动仪测量装置。(a)温度脉动仪;(b)铂丝探头

Fig. 8 Micro-thermometer measurement system. (a) Micro-thermometer; (b) platinum wire probe

4 实验结果与分析

4.1 实验结果评价指标

为了更好地分析所提算法与温度脉动仪实测结果的误差,引入了相关评价指标来客观评价所提算法输出结果的准确性。引入的相关指标包括平均偏差 (BIAS) D_{BIAS} 、方均根误差 (RMSE) E_{RMS} ^[30], 以及相关系数 R_{xy} 。上述 3 个指标的表达式为

$$D_{\text{BIAS}} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i - Y_i}{N}, \quad (12)$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}}, \quad (13)$$

并对该温差的平方取平均值得到,温度结构函数 D_T 与温度结构常数 C_T^2 满足以下关系^[24],即

$$D_T(r) = \left\langle [T(x) - T(r+x)]^2 \right\rangle = C_T^2 r^{2/3}, \quad l_0 \ll |r| \ll L_0, \quad (10)$$

式中: x 和 r 分别表示位置; $T(x)$ 和 $T(x+r)$ 分别表示空间距离为 x 和 $x+r$ 的温度; $\langle \cdot \rangle$ 表示系综平均; L_0 和 l_0 分别表示湍流外尺度与内尺度。大气湍流折射率结构常数与温度结构常数的关系^[25]可表示为

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2} \right) C_T^2, \quad (11)$$

式中: P 为气压。通过温度脉动仪的实时测量可知,每天的气压起伏变化在 1% 左右。从式(11)可以看到,大气湍流折射率结构常数与温度结构常数成正相关关系。仪器内置的微温传感器频率响应范围为 0.05~30 Hz,最小温度扰动偏差小于 0.002 K^[26-29]。微温传感器包含的两个微温探头相距 1 m,直径约为 10 μm 的铂丝探针组成惠斯通电桥的两臂。利用微温探头测量两个不同位置的温差,并将其转化为电阻差,而后通过惠斯通电桥转化为电压差,由于传感器的输出电压与两测量点温差变化成正相关,因此利用式(10)计算得到 5 s 统计时间分辨率的温度结构常数 C_T^2 ,再代入式(11)得到大气湍流折射率结构常数 C_n^2 。温度脉动仪测量装置如图 8 所示。

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (14)$$

式中: X_i 和 Y_i 分别表示第 i 时刻的算法估计值与仪器测量值; N 为 (X_i, Y_i) 数据的数量; \bar{X} 为估算方法计算的平均值; \bar{Y} 为测量值的平均值。

4.2 实验结果

所提模型中需要通过光流计算得到到达角起伏方差,才能计算大气光学湍流参数。图 9 具体展示了在 6 天观测实验中,通过图像反演出不同时刻的到达角起伏方差值。不难看出,这 6 天到达角整体变化趋势是一致的,均在中午时段达到峰值,在早晚时段都处于较低水平。2022 年 3 月 6 日 9 时 36 分至 12 时的数据变化

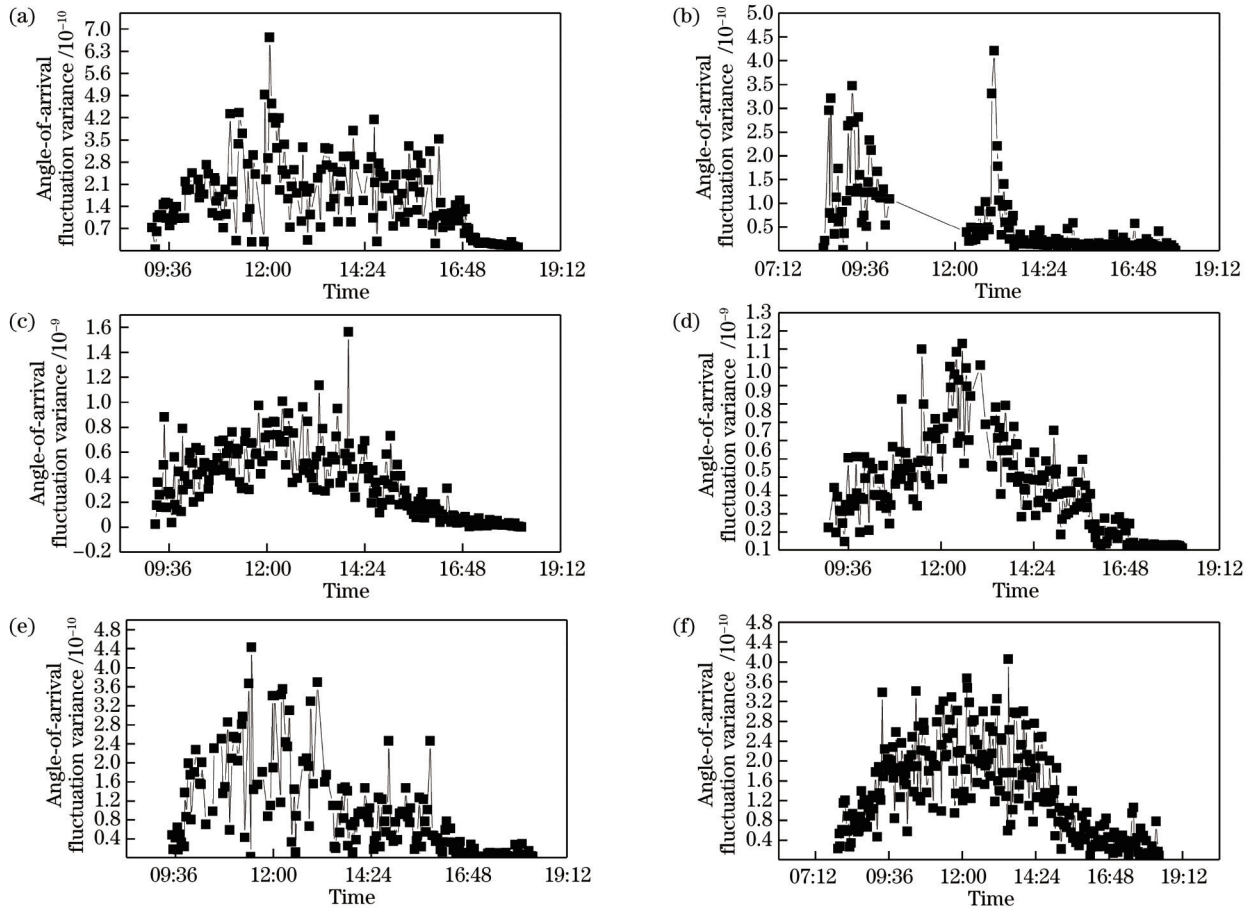


图 9 通过 6 天观测图像反演得到的到达角起伏方差值。(a) 2022 年 3 月 5 日; (b) 2022 年 3 月 6 日; (c) 2022 年 3 月 7 日; (d) 2022 年 3 月 8 日; (e) 2022 年 3 月 27 日; (f) 2022 年 3 月 28 日

Fig. 9 Angle-of-arrival fluctuation variance value obtained by inversion of 6-day observation images. (a) Mar. 5, 2022; (b) Mar. 6, 2022; (c) Mar. 7, 2022; (d) Mar. 8, 2022; (e) Mar. 27, 2022; (f) Mar. 28, 2022

趋势出现异常是因为在该段时间,脉动仪铂丝被细绳刮断,因此在这段时间停止实验,修理仪器。

图 10 具体展示了通过 MAD 光流计算方法估计的 C_n^2 的变化趋势及其与温度脉动仪实测值的比较。可以看出,不管是利用算法估计还是通过温度脉动仪进行实测, C_n^2 均具有明显的日变化趋势。 C_n^2 一般在 12 时到 13 时取得最大值,而在 18 时左右, C_n^2 的值逐渐降低至最小,这与图 9 到达角起伏方差的变化趋势一致。由于 18 时 20 分以后天色太暗,此时不再满足光流计算的基本条件,因此观测一般在 18 时 20 分左右结束。

4.3 客观评价指标分析

采用上述列出的评价指标对实验过程中总共 6 天的估算结果与温度脉动仪实测值进行客观评价,具体结果如图 11 所示。图 11(a) 为模型估算与仪器测量结果的散点图。通过对比可以发现,这 6 天的估算结果与仪器测量结果具有明显的线性相关性,仅有少数散点偏离轴线较远,这可能是因为短时间内光照出现变化,导致光流计算的结果出现偏差,进而影响最终的估算结果。通过使用统计评价指标得到 BIAS、RMSE、 R_{xy} 的值分别为 -0.0202、0.2391、0.8230,进一步证明所提图像反演方法的可行性较高。图 11(b) 为估算值

与实测值的直方图与核密度图,通过直方图可以看出:在 $[-15.0, -14.5]$ 以及 $[-14.0, -13.0]$ 区间,实测值比估计值分布要多,说明在这两个区间估计值偏小;而在 $[-14.5, -14.0]$ 以及 $[-13.0, -12.5]$ 区间,估计值分布比实测值分布要多,说明在这两个区间,估计值偏大。从核密度图可以看出,实测值与估计值的变化趋势比较接近,说明所提模型可以有效估算近地面大气湍流的日变化趋势。

4.4 模型估计精度的影响因素

本节将分析模型估计精度的外在影响因素,这对于模型推广具有重要意义。由于所提方法是基于光流计算来反演大气湍流参数,因此其对光流计算图像亮度和拍摄图像模糊程度的影响成为重点考虑的因素。对于图像亮度的影响因素,由于望远镜系统在拍摄目标靶点建筑时,图像的亮度在不同的观测时刻会发生变化,这对于依靠光流捕捉观测目标的抖动信息会产生影响。因此,分别计算了 6 天中早上(8:00—9:00)、中午(12:00—13:00)、傍晚(17:30—18:20)的光流计算估计值与温度脉动仪实测值的相关系数,分别为 0.3054、0.8150、0.2143。可以看出,所提算法对早上和傍晚的湍流变化趋势的估算效果较差,对于中午的

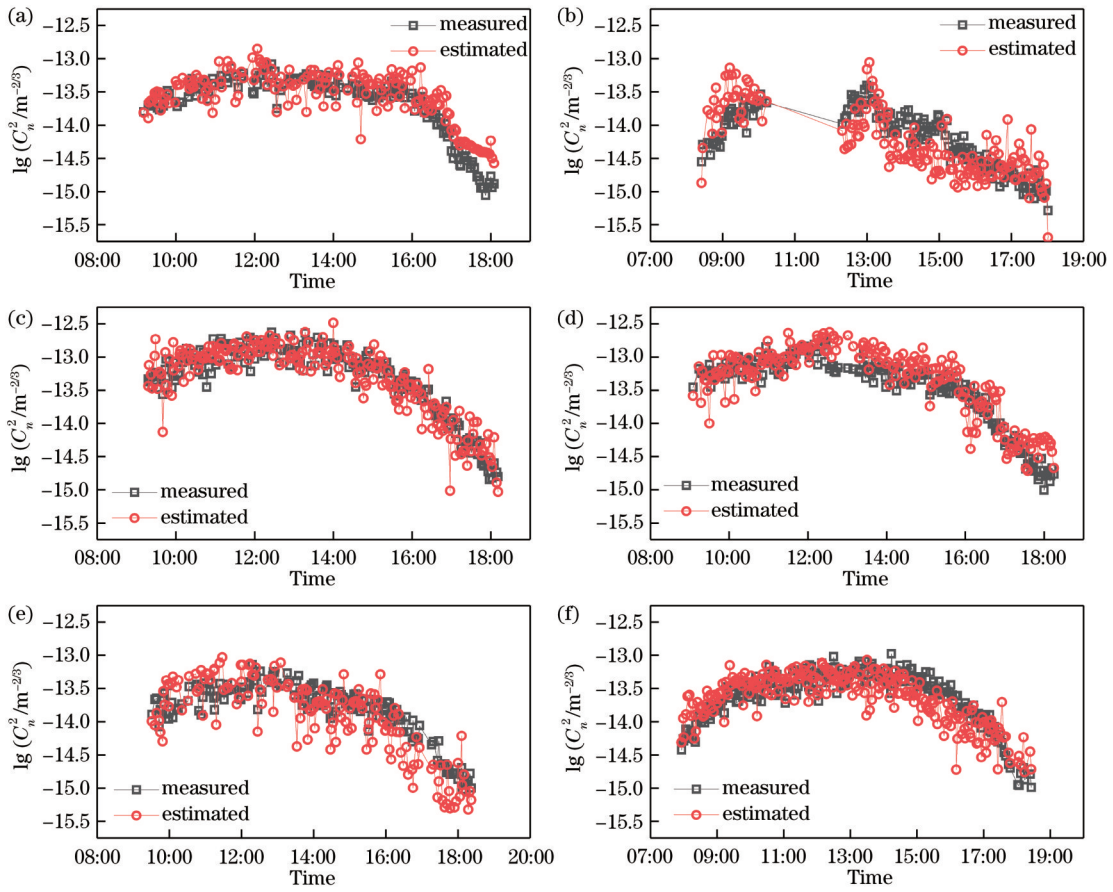


图 10 6 天观测图像得到的估算值与仪器实测值对比。(a) 2022 年 3 月 5 日 ;(b) 2022 年 3 月 6 日 ;(c) 2022 年 3 月 7 日 ;(d) 2022 年 3 月 8 日 ;(e) 2022 年 3 月 27 日 ;(f) 2022 年 3 月 28 日

Fig. 10 Comparison of estimated value and measured value of the instrument from the 6-day observation images. (a) Mar. 5, 2022; (b) Mar. 6, 2022; (c) Mar. 7, 2022; (d) Mar. 8, 2022; (e) Mar. 27, 2022; (f) Mar. 28, 2022

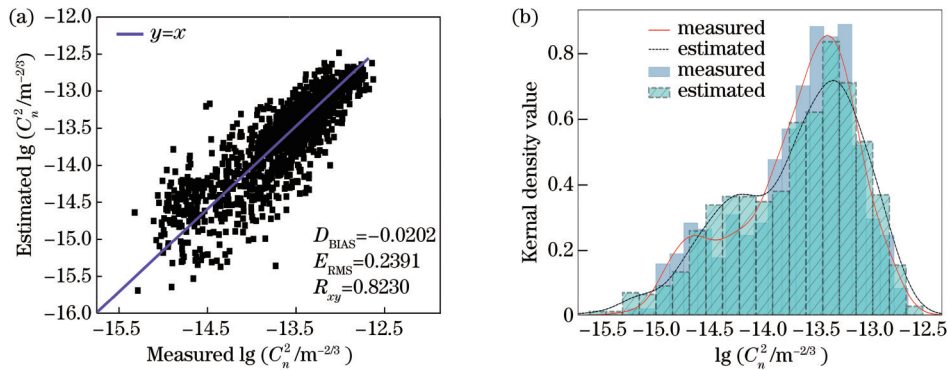


图 11 上述 6 天温度脉动仪实测数据与模型估算数据图示分析。(a) 散点图 ;(b) 直方图和核密度图

Fig. 11 Graphical analysis of measured data by temperature pulsatile instrument and model estimated data of the above-mentioned 6-day. (a) Scatter plot; (b) histogram and kernel density plot

估算效果较好,说明图像的亮度变化对于所提算法的估算效果会带来一定影响。同时,根据近地面光学湍流的变化规律,对于所选的早上和傍晚时段,近地面的湍流正处在转换过程中,此时湍流起伏波动比较大;而在中午时段,由于此时温度相对较高,湍流在观测路径内充分发挥,并且比较均匀,更符合 Kolmogorov 湍流特性,而这也提高了该时段内光流计算方法的估算精度。对于图像的模糊度,由于学界尚未有明确的定量

评价标准,因此只能通过肉眼分析,发现当拍摄图像较为模糊时,很难捕捉到相邻帧图像的抖动信息,此时所提算法的估算结果较差。图 12 具体展示了不同状态下的实拍靶点图像案例,其中图 12(a)表示在亮度较暗的情况下的观测图像,图 12(b)表示在较为模糊的情况下的观测图像,图 12(c)表示正常状态下的观测图像。可以看出,所提算法在前两种状态下的估算效果较差,在第三种状态下的估算效果较好。

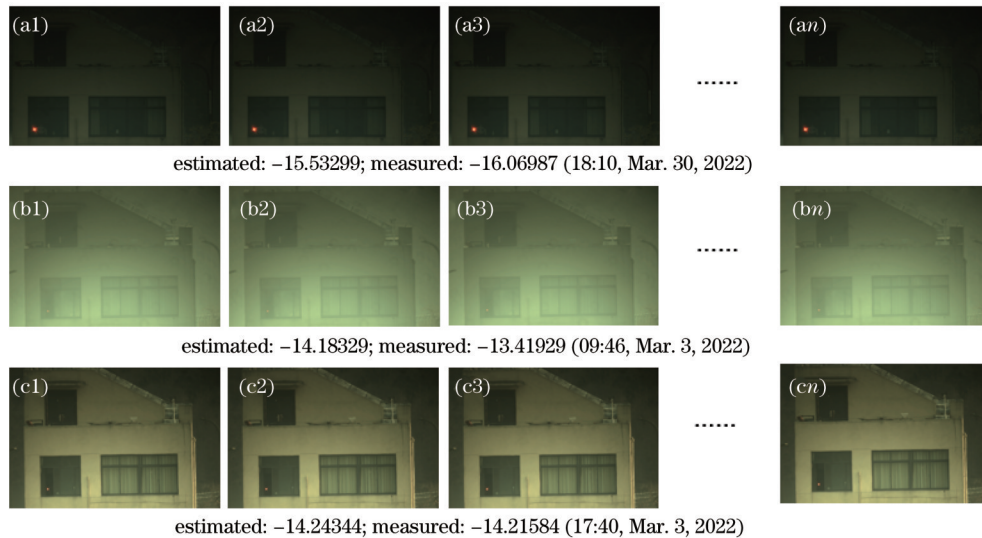


图 12 3 种不同状态下的观测图像及其对应的估计值与实测值。(a) 图像亮度低; (b) 图像模糊; (c) 正常状态

Fig. 12 Estimated and measured values of observation images in three different states. (a) In low brightness state; (b) in blurred state; (c) in the normal state

5 结 论

提出一种基于 MAD 的改进 L-K 金字塔光流计算方法, 并用于对近地面大气湍流参数进行长时间连续估算。所提方法中包含了 MAD 自适应剔除离群值。对所提方法的估算结果与温度脉动仪实测值进行充分对比, 得出下述结论: 通过利用望远镜系统连续拍摄目标靶点图像来反演大气光学湍流参数的估算方法是可行的, 并且得出的估算结果与实测值具有高度的线性相关性; 由于观测实验所需的硬件平台仅为一套光学望远镜系统, 因此所提方法具有极大的推广意义。但是, 由于观测实验中采用的是可见光波段相机, 因此目前估算大气湍流参数的时段仅限于能见度较好的白天。在处理数据过程中, 由定性分析的结果可知, 拍摄图像的模糊度与亮度可能是光流计算精度的重要影响因素, 这主要是因为拍摄目标靶点位于水面附近, 不可避免地会出现水汽, 从而影响拍摄图像的分辨率。同时, 早晚光照较弱以及湍流处于起伏变化中, 这也会对相邻两帧图像的光流计算产生误差。

接下来, 将尝试利用红外相机来估算昼夜的近地面大气湍流变化趋势, 同时定量分析相关外界因素对算法估计精度的影响。

参 考 文 献

- [1] Chen E L, Haik O, Yitzhaky Y. Detecting and tracking moving objects in long-distance imaging through turbulent medium[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(6): 1181-1190.
- [2] 柳光乾, 杨磊, 邓林华, 等. 大气湍流对天文望远镜光电导行精度的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0101002. Liu G Q, Yang L, Deng L H, et al. Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of astronomical telescope auto-Guiding system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0101002.
- [3] 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005. Rao R Z. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2005.
- [4] 马圣杰, 郝士琦, 赵青松. 基于改进型 SPGD 算法的涡旋光波前畸变校正[J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0601001. Ma S J, Hao S Q, Zhao Q S. Wavefront distortion correction of vortex beam based on improved SPGD algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0601001.
- [5] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1990, 227: 294-300.
- [6] Whiteley M R, Washburn D C, Wright L A. Differential-tilt technique for saturation-resistant profiling of atmospheric turbulence[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4494: 221-232.
- [7] Coburn D, Garnier D, Dainty J C. A single star SCIDAR system for profiling atmospheric turbulence[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5981: 105-114.
- [8] 韩亚娟, 吴晓庆, 罗涛, 等. 拉萨光学湍流探空测量与模式分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0601002. Han Y J, Wu X Q, Luo T, et al. Optical turbulence measurement over Lhasa using a meteorological radiosonde and model analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0601002.
- [9] 毕翠翠, 青春, 钱仙妹, 等. 基于反向传播神经网络估算大气光学湍流廓线[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(21): 2101001. Bi C C, Qing C, Qian X M, et al. Estimation of atmospheric optical turbulence profile based on back propagation neural network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(21): 2101001.
- [10] Bose-Pillai S R, McCrae J E, Rice C A, et al. Estimation of atmospheric turbulence using differential

- motion of extended features in time-lapse imagery[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(10): 104108.
- [11] McCrae J E, Bose-Pillai S R, Fiorino S T. Estimation of turbulence from time-lapse imagery[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(7): 071504.
- [12] Webb A J, Roggemann M C, Whiteley M R. Atmospheric turbulence characterization through multiframe blind deconvolution[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(17): 5031-5036.
- [13] Vernin J, Munoz-Tunon C. Measuring astronomical seeing: the DA/IAC DIMM[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1995, 107: 265-272.
- [14] Kornilov V, Tokovinin A, Shatsky N, et al. Combined MASS-DIMM instruments for atmospheric turbulence studies[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, 382(3): 1268-1278.
- [15] 仇陈祥, 侯再红, 靖旭, 等. 双向大气相干长度测量获取湍流模式及日变化分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0901002.
- Qiu C X, Hou Z H, Jing X, et al. Turbulence models and daily variations obtained by bidirectional atmospheric coherent length measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0901002.
- [16] Prentice W C H, Gibson J J. The perception of the visual world[J]. *The American Journal of Psychology*, 1951, 64(4): 622-625.
- [17] Reichardt W, Poggio T. Visual control of orientation behaviour in the fly. Part I. A quantitative analysis[J]. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 1976, 9(3): 311-375, 428-438.
- [18] Lucas B, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C]// *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, August 24-28, 1981, Vancouver, BC, Canada. Manhattan: William Kaufmann, 1981: 674-679.
- [19] 刘攀, 李晓峰. 大气湍流信道中的激光束传输到达角起伏计算及实验[J]. *空间电子技术*, 2011, 8(4): 9-12.
- Liu P, Li X F. The calculation and experiment of angle-of-arrival fluctuation of laser beam transmission in the channel of atmospheric turbulence[J]. *Space Electronic Technology*, 2011, 8(4): 9-12.
- [20] 宋卢军, 倪小龙, 刘艺, 等. 到达角起伏与闪烁效应测量折射率结构常数的比较[J]. *光学学报*, 2015(s1): s101003.
- Song L J, Ni X L, Liu Y, et al. Comparison of refractive index structure constant deduced from angle of arrival fluctuation and scintillation effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015(s1): s101003.
- [21] Rousseeuw P J, Croux C. Alternatives to the Median absolute deviation[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1993, 88(424): 1273-1283.
- [22] Leys C, Ley C, Klein O, et al. Detecting outliers: do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median[J]. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2013, 49(4): 764-766.
- [23] Liu X, Deng J H, Li K F, et al. Optical telescope with Cassegrain metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3263-3269.
- [24] Kolmogorov A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1991, 434(1890): 9-13.
- [25] 塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩, 译. 北京: 科学出版社, 1978.
- Татарский В И. Wave propagation in a turbulent medium [M]. Wen J S, Transl. Beijing: Science Press, 1978.
- [26] Wu X Q, Tian Q G, Jiang P, et al. A new method of measuring optical turbulence of atmospheric surface layer at Antarctic Taishan Station with ultrasonic anemometer[J]. *Advances in Polar Science*, 2015, 26(4): 305-310.
- [27] Qing C, Wu X Q, Li X B, et al. Use of weather research and forecasting model outputs to obtain near-surface refractive index structure constant over the ocean[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13303-13315.
- [28] Qing C, Wu X Q, Li X B, et al. Mesoscale optical turbulence simulations above Tibetan Plateau: first attempt[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 4571-4586.
- [29] Han Y J, Wu X Q, Luo T, et al. New C_n^2 statistical model based on first radiosonde turbulence observation over Lhasa[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(6): 995-1001.
- [30] Masciadri E, Lascaux F, Fini L. MOSE: operational forecast of the optical turbulence and atmospheric parameters at European Southern Observatory ground-based sites-I. Overview and vertical stratification of atmospheric parameters at 0-20 km[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 436(3): 1968-1985.