

基于旋转非局部图像的大气相干长度实验测量方法

徐萌兮¹, 徐焕宇²

(1. 无锡学院 轨道交通学院; 2. 无锡学院 物联网工程学院, 江苏 无锡 214105)

摘要: 大气相干长度与闪烁指数是评价大气湍流起伏的指标, 在天文台选址及激光通信领域具有重要参考价值。论述了使用差分像运动法测量大气相干长度与闪烁指数测量系统的结构与实现方法, 并针对成像系统采集到的含噪目标图像, 使用非局部均值方法计算目标质心。仿真实验结果显示, 去除背景后使用非局部均值加权计算质心方法的精度相比其他质心计算方法精度更高, 尤其是在信噪比较低的情况下更为显著, 平均误差值可达0.013, 表明该方法能够有效提升质心计算精度。实际测量结果也表明, 该方法能够提高系统的大气数据测量准确性, 具有一定实用价值。

关键词: 大气相干长度; 闪烁指数; 非局部均值; 质心计算

DOI: 10.11907/rjtk.241326

中图分类号: TP391

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1672-7800(2025)006-0102-05



Experimental Measurement Method of Atmospheric Coherence Length Based on Rotated Nonlocal Image

XU Mengxi¹, XU Huanyu²

(1. College of Rail Transit, Wuxi University; 2. College of IOT, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

Abstract: Atmospheric coherence length and scintillation index can evaluate atmospheric turbulence and its fluctuation, they have great significance in observatory location and laser communication. This paper discusses the structure and implementation of the measurement system for atmospheric coherence length and scintillation index using differential image motion method and uses nonlocal mean strategy to improve the centroid calculation process for the collected noisy images. The simulation results show that the accuracy of the method of centroid calculation using non-local mean weighted method after removing background is higher than that of other centroid calculation methods, especially in the case of low signal-to-noise ratio. The average error is 0.013, indicating that the method can effectively improve the centroid calculation accuracy. The actual measurement results also show that the method can improve the accuracy of atmospheric data measurement and has certain practical value.

Key Words: atmospheric coherence length; scintillation index; nonlocal mean; centroid calculation

0 引言

大气湍流是大气分子的随机运动而造成, 不同地理位置的大气湍流特性不尽相同。光在大气湍流中传播时, 会产生光线随机漂移、闪烁、相位面畸变等现象。大气湍流的强弱对于空间观测和激光通信等均有重要影响, 甚至决

定着其技术可行性, 因而在天文台选址与光波大气传输应用中需考虑大气湍流强度^[1-2]。

大气相干长度(以下简称 r_0)是衡量光束在大气湍流中传输的空间相干程度及大气动态扰动综合强度的参数, 其物理意义是, 湍流大气中能够实现衍射受限成像的光学系统口径上限。大气相干长度的测量方法中, 差分像运动法(Differential Image Motion Method, DIMM)^[3-7]能够有效地

收稿日期: 2024-04-26

扫描二维码阅读全文:



基金项目: 国家自然科学基金项目(11704377); 江苏省高校哲学社会科学研究项目(2022SJYB0986, 2022SJYB0987)

作者简介: 徐萌兮(1986-), 女, 硕士, 无锡学院轨道交通学院讲师, 研究方向为图像处理、实验管理; 徐焕宇(1985-), 男, 博士, 无锡学院物联网工程学院副教授、硕士生导师, 研究方向为图像处理、机器学习。本文通讯作者: 徐焕宇。

排除非大气湍流因素(如望远镜的跟踪移动、望远镜的随机抖动等)对测量结果的影响,目前已成为天文选址和激光大气传输中测量 r_0 的主要手段^[8]。闪烁指数是衡量光在大气传输中接收端光强的起伏情况,闪烁指数越低,光信号的误码率越低,其同样是大气光通信中必须参考的指标之一^[9-10]。

然而,在使用DIMM方法计算大气相干长度与闪烁指数的过程中,由于成像相机曝光时间短且成像目标亮度低,所拍摄到的图像中包含有强烈的噪声。噪声会影响成像目标的质心计算精度,从而影响大气相干长度的测量精度,因此在计算过程中需尽量减少噪声对计算精度的影响。

本文论述了使用DIMM到达角起伏方法测量计算大气相干长度与闪烁指数的系统结构与实现方法。针对成像系统噪声造成的测量值误差及抖动进行分析,并使用非局部均值与旋转图像片的方法对图像目标质心计算过程进行优化,提高计算精度,并在仿真数据中进行验证。最后,将本文计算方法应用于实际测量系统以验证稳定性与有效性。

1 基本原理

1.1 大气相干长度测量原理

DIMM测量大气相干长度原理如图1所示。其通常做法是在望远镜入瞳处放置2个子孔径或者4个子孔径的模板,并且在每个子孔径的光路中加入一块小角度的光楔,使成像目标经过每个子孔径在相机中成像且不重叠。成像目标的平面光波经过大气湍流后波面发生畸变,畸变后波前的不同部分在不同时刻传播方向也在发生改变,成像目标所成的像在中心位置附近随机抖动。使用成像相机记录一段时间序列的多帧瞬时图像,统计图像中各子孔径中目标位置差异的方差即可求得大气相干长度。从上述原理可以看出,DIMM方法对仪器自身的随机震动和跟踪误差并不敏感,子孔径中目标位置的差异主要由大气湍流造成。但由于成像曝光时间内的积分效应,子孔径中目标位置差异相较于瞬时真实情况通常偏小,因此测得的大气相干长度 r_0 较真实情况偏高^[11]。

DIMM方法的原理如式(1)、式(2)所示。

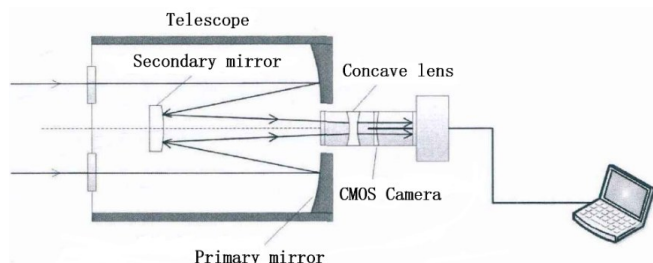


Fig. 1 The overall structure of measurement system

图1 测量系统总体结构

$$\sigma_v^2 = 2\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} [0.179D^{-\frac{1}{3}} - 0.0968d^{-\frac{1}{3}}] \quad (1)$$

$$\sigma_h^2 = 2\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} [0.179D^{-\frac{1}{3}} - 0.145d^{-\frac{1}{3}}] \quad (2)$$

其中, λ 为激光传输波长, D 为子孔径直径, d 为子孔径中心间距, σ_v 与 σ_h 分别为垂直和平行于两子孔径连线方向上的图像分离量的方差。将平行与垂直的子孔径进行合并,并将 r_0 移动到等式左边可得如式(3)所示。

$$r_0 = 100 \times \{2f^2 \lambda^5 [0.179D^{-\frac{1}{3}} - 0.1209d^{-\frac{1}{3}}] / \sigma^2\}^{\frac{3}{5}} \times r_0^{-\frac{5}{3}} \times D_{lens}/D \quad (3)$$

其中,100起单位转换作用, σ^2 为各子孔径间所有连线方向上的图像分离量方差的均值,它也等于各子孔径图像分离像素数的方差与像素尺寸平方乘积的均值。 D_{lens} 为一个微透镜对应望远镜上的孔径, f 为微透镜焦距。

1.2 闪烁指数测量原理

闪烁指数的测量与计算相对简单,主要利用各子孔径中目标图像的光强起伏进行计算。首先分别对每一个子孔径内的图像数据进行 N_{frame} 帧图像的归一化起伏方差统计,得到4个子孔径的归一化光强起伏方差 σ_i^2 ,如式(4)所示。

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N_{frame} \langle I_i \rangle^2} \sum_{j=1}^{N_{frame}} (I_{ij} - \langle I_i \rangle)^2 \quad (4)$$

其中, I_{ij} 为第 i 个子孔径在第 j 帧图像中光点区域的灰度之和, $\langle I_i \rangle$ 为第 i 个子孔径光点区域灰度之和在 N_{frame} 帧图像中的均值。再对4个子孔径的归一化光强起伏方差 σ_i^2 求平均值,获得闪烁指数。

2 基于旋转非局部的图像恒星目标质心计算方法

2.1 测量误差分析

关于大气相干长度测量的误差来源,已有相关文献进行过讨论^[11-12]。其基本结论为测量仪器本身的随机震动与成像系统的静态像差对于到达角起伏方法测量大气相干长度的误差可以忽略,主要误差来源为统计误差、曝光时间与成像噪声所带来的积分效应。

根据Frieden的研究,双像质心相对运动的统计误差如式(5)所示^[13]。

$$\frac{\Delta\sigma^2}{\sigma^2} = \sqrt{\frac{2}{N-1}} \quad (5)$$

其中, σ^2 为双像质心相对位置方差, $\Delta\sigma^2$ 为 σ^2 的标准误差, N 为图像样本数目。从式(5)可以看出,如果想减小误差,需增大采样样本数。在典型的大气环境中,通常认为大气的统计特性在一分钟内保持不变,即一分钟内能够采集图像帧的数量即为 N ,这与成像相机和数据处理计算机的性能有关,与曝光时间近似成反比关系。因此,既要保证图像的信噪比,又要尽可能提高帧频在一分钟内采集到更多图像。本文设计实现的大气相干长度测量仪可以根据恒星目标的光强自动调节帧频与曝光时间,帧频调节

范围为 100~200 Hz,曝光时间的调节范围为 5~10 ms。

信噪比也是大气相干长度测量中的重要误差来源,图像信噪比越低,计算得到的大气相干长度误差越大,因而需要尽可能消除图像噪声以提升信噪比。硬件层面,由于需要保证成像帧频并减少曝光积分效应,曝光时间只能控制在 5~10 ms,故在测量时应尽可能地选择自身光强较高的恒星作为观测目标。软件算法层面,本文使用图像处理手段以降低信噪比对大气相干长度测量的影响。

2.2 旋转图像非局部均值图像滤波方法

非局部均值((Non-Local Means, NL-means)算法的思路是在图像中寻找出与待滤波像素点相似的像素点,构成一个非局部像素点集合,在非局部区域内进行加权平均滤波得到去噪后的像素值^[14]。

对于图像中任一像素点 x ,与图像中另一像素点 y 的相似性权重计算方法如式(6)所示。

$$w(x, y) = e^{(d(x, y)/h)^2} \quad (6)$$

其中, h 为滤波器系数,当 h 的取值较大时,滤波窗口内各像素点的相似性权值差别较小,滤波效果越接近均值滤波;当 h 的取值较小时,滤波窗口内各像素点的相似性权值差别较大,去噪能力较弱。 $d(x, y)$ 为两点的距离度量函数,具体定义如式(7)所示。

$$d(x, y) = \int_{\eta} G_a(t) |I(x+t) - I(y+t)|^2 dt, \quad (7)$$

其中, η 为计算两像素点相似性时使用的领域窗口大小, $I(x+t)$ 表示像素点 $(x+t)$ 处的像素点灰度值, $G_a(t)$ 表示方差为 a 的高斯核函数。由式(6)和式(7)可知,两个像素的周围结构越相似,则权重系数越大。

在像素点 x 周围领域 $\Omega(x)$ 内计算所有像素点与像素点 x 之间的相似性,根据相似性重新组成了像素点 x 的非局部领域 $NL(x)$,最后在非局部邻域中对各像素点 x 计算加权平均后的像素值即为去噪结果 $u(x)$,如式(8)所示。

$$u(x) = \frac{1}{C(x)} \int_{\Omega(x)} w(x, y) I(y) dy \quad (8)$$

原始的非局部均值算法会对图像中的每个像素点与其余像素点进行权重计算。但在实际应用中,尤其类似于本文对帧频要求较高的场景,该方法的时间和空间复杂度都较高。基于效率考虑,通常采用半局部方法计算权重系数,即对于每个像素,只计算其周围一定窗口大小内像素的权值,其余像素对该像素的权值为0,该窗口即为查找区域。在本文场景中,仅需计算恒星目标区域中的每个像素相对于目标区域其他像素的权重即可,即计算均在目标区域完成,如此可极大提高计算效率,满足本文计算频率的要求。

并且,在本文应用场景中,恒星目标成像通常为点光源圆形光斑。因此,为了更有效地利用目标形态,消除目标中的噪声,如图2所示,对于目标区域中的每个图像片(a),旋转 90° 得到图像片(b)、旋转 180° 得到图像片(c)、旋

转 270° 获得得到图像片(d),然后将图像片(a)(b)(c)(d)均用于后续权重计算与加权平均。

1	2	3	7	4	1	9	8	7	3	6	9
4	5	6	8	5	2	6	5	4	2	5	8
7	8	9	9	6	3	3	2	1	1	4	7

(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 2 Diagrammatic sketch of image patch rotation

图2 图像片旋转示意图

2.3 恒星目标质心计算流程

由上文测量误差分析可知,成像噪声是DIMM测量大气相干长度误差的重要来源。传统质心计算方法中通常先对每帧采集到的图像逐像素减掉平均噪声强度的灰度值,即扣背底,然后使用质心计算公式计算图像中目标的质心。这种方法能够有效降低图像的背景噪声,提高质心计算精度,同时处理简单高效,满足计算频率要求。但是,由于天文图像的主要噪声形式为泊松噪声,噪声强度与各像素点原始光强相关,因此很难使用扣背底方法完全消除噪声影响。并且,扣背底的力度也较难掌握,力度大会影响非噪声数据,力度较小则有噪声残留。

本文使用扣背底加旋转图像片非局部均值方法计算质心,在不影响原始成像信息的前提下,尽可能提高质心计算精度。具体流程如下:

Step1:在采集到的图像中,使用一个比恒星目标光斑尺寸稍大,且能够完整包含恒星目标光斑的模板对图像进行遍历,计算每个图像块的总光强与方差,本文系统使用 15×15 大小的模板。统计总光强最高的图像块,即认为恒星目标光斑全部包含在图像块内,后续计算目标光斑偏移量时仅使用此图像块进行计算,这就消除了图像中无目标区域噪声对于偏移量计算的影响。同时,找到总光强最低的几组图像块,认为其中完全不包含有目标,计算这些图像块的总标准差,并将此标准差作为当前曝光时间下图像中噪声的标准差。

Step2:对包含有目标的图像块扣除背底。经试验测试验证,本文系统在扣除0.8倍的图像噪声标准差时能够获得最佳的质心计算精度。

Step3:计算目标质心。虽然扣除了背底,但目标图像块中依然受噪声影响,因此在计算质心时,本文使用上文提出的旋转非局部均值算法计算质心。首先,将Step1中得到的 15×15 目标图像块,步长为1的分解为 3×3 相互重叠的小图像块;其次,根据图2方法,将每个图像块进行旋转获得4块图像块;再次,根据式(6)计算每个中心像素点所在图像块相对于其它图像块的权重,并根据式(8)更新当前中心像素点的值;最后,使用更新后的像素点计算质心。这样做能够充分利用图像本身的信息与结构特点进行滤波,降低噪声对光斑目标质心计算所造成的影响。

3 实验结果与分析

3.1 测量仪系统

系统硬件部分主要由 MEADE 望远镜、Andor Zyla CMOS 相机、PI 电控位移台、高性能计算工作站组成。MEADE 望远镜由望远镜主体与支架两部分组成,其中 MEADE 望远镜主体顶部入瞳处有 4 个小孔,各有盖子遮挡;望远镜主体底部固定有 PI 电控位移台和 Andor Zylar CMOS 相机,它们与望远镜主体组合为一个整体。高性能计算工作站用于连接 MEADE 望远镜、CMOS 相机、电控位移台等设备,接收各设备获取的数据。同时,其安装有 MEADE 望远镜控制软件以及本项目所开发的大气相干长度与闪烁指数测量软件,能够进行望远镜控制与大气相干长度和闪烁指数的测量任务。

系统主要参数如下:望远镜口径 350 mm,望远镜焦距 3.5 m,子孔径数量 4,子孔径口径 100 mm,相邻子孔径间距 170 mm,对角子孔径间距 240 mm,相机像素分辨率 2 048×2 048,相机像素尺寸 6.5 μm,相机探测波段为可见光,外部工作环境:−30~40 °C。系统可以实现大气相干长度测量,到达角起伏测量,闪烁指数测量以及各种数据的实时处理与显示,同时还可以连接外部气象设备以测量其它大气数据。

3.2 质心计算精度实验

由于真实测量成像数据的原始图像无法获取,信噪比难以控制,因此实验中使用人工生成的恒星目标图像并施加噪声以验证本文质心计算方法的精度。首先生成一个面积为 15 像素左右且像素值为 1(本文试验中像素值取值范围均归一化为 0~1)的目标 u ,然后对其施加使用 Kolmogorov 相位理论且 D/r_0 参数值为 10 所生成的随机点扩散函数以对观测环境进行仿真。由于光子噪声符合泊松分布且是天文观测噪声的主要来源,故将模糊图像的灰度值拉伸至 0~1 后,再拉伸 k 倍并引入泊松噪声,如式(9)所示。参数 k 的值越大,泊松噪声越强,本文实验中参数 k 值选取为 1 000、100、40,以分别对高、中、低噪声情况进行仿真。

$$g_p \sim \text{Poisson}(k(h * u)) \tag{9}$$

最后,向含有泊松噪声的图像中加入方差为 0.01 的高斯噪声以仿真读出噪声,得到最终退化图像,如式(10)所示。

$$g = g_p + n \tag{10}$$

将本文方法(去除背底后使用本文非局部均值加权计算质心)与直接计算质心、去除背底后计算质心、使用原始非局部均值计算质心、仅使用本文非局部均值加权计算质心以及去除背底后使用原始非局部均值加权计算质心等 5 种方法进行比较。每种噪声水平随机生成 100 幅含噪声图像,计算获得质心与准确质心位置的偏差平均值,比较结果如表 1 所示。

Table 1 Accuracy of different centroid calculation methods

表 1 不同质心计算方法精度

噪声等级	质心计算平均误差					
	无	去除背底	原始 NL	本文 NL	去除背底+原	去除背底+本
			滤波	滤波	始 NL 滤波	文 NL 滤波
$k=40$	0.252	0.082	0.054	0.021	0.180	0.013
$k=100$	0.281	0.083	0.058	0.025	0.230	0.014
$k=1\ 000$	0.307	0.091	0.061	0.042	0.350	0.020

可以看到,去除背底方法的质心计算精度均优于直接计算方法,并且本文非局部均值加权相比于原始非局部均值方法能够极大提高质心计算精度,去除背底后使用本文非局部均值加权计算质心方法的精度相比于其它质心计算方法精度最高,尤其是在信噪比较低的情况下更为显著,证明了本文质心计算方法的有效性。

3.3 大气相干长度与闪烁指数实测实验结果

为了验证本文测量方法在实际应用中的效果,使用自制的 DIMM 大气相干长度与闪烁指数测量仪,在户外进行观星实验。观测位置为吉林省长春市,海拔 204 m,北纬 43°50',东经 125°24'。观测时间为 2023 年 8 月 21 日、8 月 22 日两天夜晚。观测得到的大气相干长度与闪烁指数如图 3—图 6 所示,图 3 和图 5 中的 Our System 为本文系统测量结果,Reference 为中国科学院安徽光机所研制的大气相干长度测量仪,两台设备同时同地的测量结果。本文系统的大气相干长度测量结果符合当时当地天气条件,且与安徽光机所研制的 DIMM 大气相干长度测量仪在每半小时内的平均测量数据误差均在 10% 以内。本文系统闪烁指数的测量值也符合与大气相干长度成反比的规律,如果使用光强闪烁法将测量得到的大气相干长度反算回闪烁指数,两者误差也在 10% 以内。上述实验证明了本文研制的大气相干长度与闪烁指数测量系统的实用性与稳定性。

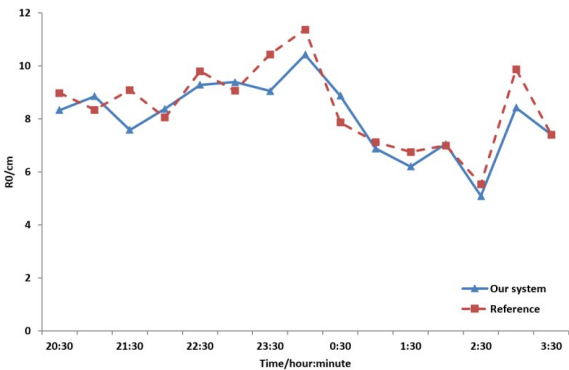


Fig. 3 Measurement results of atmospheric coherence length on August 21, 2023(1)

图 3 2023 年 8 月 21 日大气相干长度测量结果(1)

4 结语

本文详细介绍了大气相干长度与闪烁指数测量系统的硬件组成与软件算法,对大气相干长度测量中影响精度

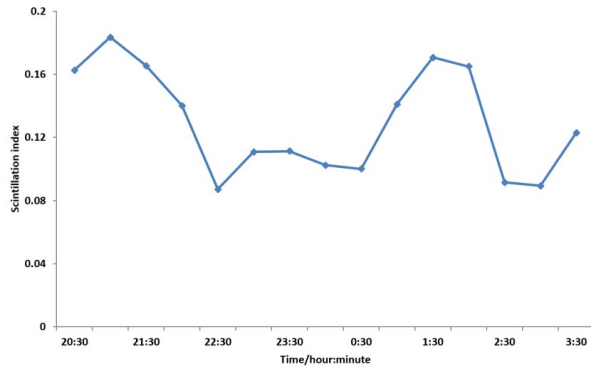


Fig. 4 Measurement results of scintillation index on August 21, 2023

(1)

图4 2023年8月21日闪烁指数测量结果(1)

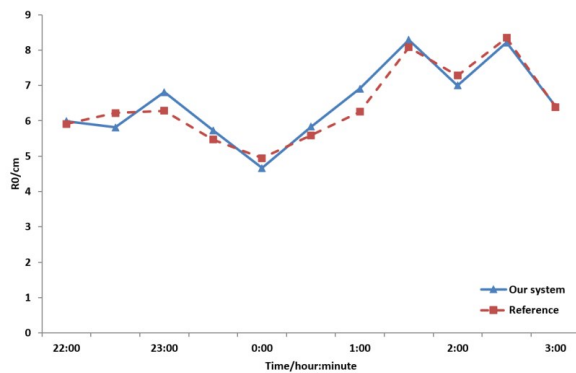


Fig. 5 Measurement results of atmospheric coherence length on August 22, 2023 (2)

图5 2023年8月22日大气相干长度测量结果(2)

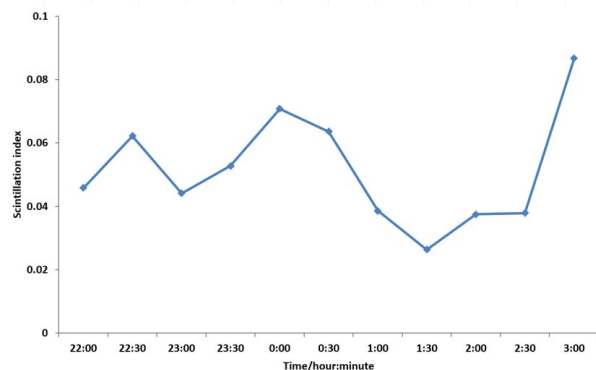


Fig. 6 Measurement results of scintillation index on August 22, 2023

(2)

图6 2023年8月22日闪烁指数测量结果(2)

的因素进行了分析并使用旋转图像片的非局部均值滤波对质心计算过程进行优化,以降低噪声对测量精度的影响。实验结果表明,本文所研制的大气相干长度与闪烁指数测量系统可以较为准确地测量所在地的大气湍流情况,进而为天文选址和激光通信等提供可靠参考。

参考文献:

- [1] FRIED D L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion [J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(11): 1427-1435.
- [2] VERNIN J. Optical seeing at La Palma Observatory. I: general guidelines

and preliminary results at the Nordic Optical Telescope [J]. Astronomy and Astrophysics, 1992, 257: 811-816.

- [3] LIU Z, QIU Y H, QIAN P. Two problems on the principle of the measurement of seeing by using the differential image motion method [J]. Publications of Yunnan Observatory, 1993(2): 54-60.
刘忠, 邱耀辉, 钱苹. 关于差分像运动法视宁度测量原理中的两个问题 [J]. 云南天文台台刊, 1993(2): 54-60.
- [4] HUANG H H, YAO Y B, RAO R Z. Measurement of atmospheric coherent length by four-aperture differential image motion method [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(3): 357-360.
黄宏华, 姚永邦, 饶瑞中. 四孔差分像运动测量大气相干长度的方法研究 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(3): 357-360.
- [5] WANG J Y, RAO R Z, LIU X C. Comparison of experimental study of atmospheric coherence length [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(1): 64-66.
汪建业, 饶瑞中, 刘晓春. 大气相干长度的对比实验研究 [J]. 中国激光, 2005, 32(1): 64-66.
- [6] XU W Q, ZONG F, QIANG X W, et al. Several critical qualifications in measurement of atmospheric coherence length [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(3): 469-472.
许文强, 宗飞, 强希文, 等. 大气相干长度测量中几个关键技术指标的分析 [J]. 应用光学, 2013, 34(3): 469-472.
- [7] YU L K, WU Y, HOU Z H, et al. Study on the measurement of coherence length by differential image motion monitor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 22-26.
于龙昆, 吴毅, 侯再红, 等. 利用差分像运动监测仪法测大气相干长度的研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(12): 22-26.
- [8] ZHANG L, TONG S F, ZHAO X. Full-time measurement system for atmospheric coherence length based on EMCCD camera [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(2): 221-226.
张雷, 佟首峰, 赵馨. 基于EMCCD相机的全天时大气相干长度测量系统 [J]. 激光与红外, 2018, 48(2): 221-226.
- [9] LI F, WU Y, HOU Z H. Data processing of scintillation index measurement in real atmosphere [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1349-1352.
李菲, 吴毅, 侯再红. 实际大气中闪烁指数测量的数据处理 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1349-1352.
- [10] WANG J B, LIU Y X, PU J X. Measuring scintillation index of laser beams propagating in turbulent atmosphere [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4): 915-918.
王佳斌, 刘永欣, 蒲继雄. 激光在湍流大气中传输的闪烁系数及其测量 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 915-918.
- [11] SHA Y. Error analysis of atmospheric coherence length measured by differential arrival angle fluctuation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
沙洋. 差分到达角起伏测量大气相干长度的误差分析 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [12] WEI P F, LIN X D, WANG L, et al. Simultaneous measurement of atmospheric coherence length [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 1840-1845.
卫沛锋, 林旭东, 王亮, 等. 大气相干长度的瞬时测量 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1840-1845.
- [13] YU L K, HE B, SHEN H, et al. Analysis of formulae in DIMM and the verified experiment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(6): 132-137.
于龙昆, 何冰, 沈红, 等. DIMM中计算公式的分析及验证实验 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(6): 132-137.
- [14] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005: 60-65.

(责任编辑:孙娟)