

doi:10.3788/gzxb20144312.1201001

差分图像运动监测仪的数值模拟与对比实验研究

陈华林^{1,2,3}, 裴冲^{1,2}, 袁祥岩^{1,2}, 崔向群^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室, 南京 210042)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 差分图像运动监测仪广泛应用于视宁度的实时测量. 利用随机相位屏和光学离焦像差模拟差分图像运动, 分析了差分图像运动监测仪的测量准确度, 结果表明差分图像运动监测仪能够可靠地测量地面处湍流. 在国家天文台兴隆观测站, 开展了两台相同硬件配置的差分图像运动监测仪的对比实验, 分析曝光时间的影响和测量结果的相关性. 结果表明: 有限曝光时间降低差分图像运动, 使视宁度值测量值偏小; 视宁度测量结果的时间变化趋势和统计结果一致性较好.

关键词: 大气光学; 湍流; 视宁度; 数值模拟; 对比实验; 天文选址; 高分辨率

中图分类号: P427.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)12-1201001-6

Research of Numerical Simulation and Comparison of Experiment from Differential Image Motion Monitor

CHEN Hua-lin^{1,2,3}, PEI Chong^{1,2}, YUAN Xiang-yan^{1,2}, CUI Xiang-qun^{1,2}

(1 National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

(2 National Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjin 210042, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Differential image motion monitor is widely used to obtain real-time seeing. Differential image motion was numerical simulated by random phase screen and optical defocus aberration, and the measurement accuracy of differential image motion monitor was analyzed, which showed that differential image motion monitor can reliably measure the near-ground turbulence. Comparison of experiment of two differential image motion monitors with the same hardwares was carried out at Xinglong Station of National Astronomical Observatory of China. The correlation between exposure time and measuring results was analyzed. The results show that the limited exposure time will reduce differential image motion and underestimate seeing value, and the trends over time and statistics of measurement results have good consistency.

Key words: Atmospheric optics; Turbulence; Seeing; Numerical simulation; Comparison of experiment; Site testing; High angular resolution

OCIS Codes: 010.1290; 030.7060; 010.0280

0 引言

现代天文高分辨光学成像以大气光学湍流参量来定量分析和研究其成像效果^[1]. 天文台址的大气光学

湍流参量主要包括湍流强度廓线和视宁度、大气等晕角、大气相干时间和波前外尺度等. 其中视宁度定义为大气长曝光图像的峰值半全宽, 表征大气湍流强度在整个路径上的积分. 由于视宁度对天文观测有重要影

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11103050)和“光谱成像与智能感知”江苏省重点实验室开放基金(No. 3092014012200409)资助

第一作者: 陈华林(1980-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为大气光学湍流. Email: hualinchen@niaot.ac.cn

导 师: 崔向群(1951-), 女, 中科院院士, 博士, 主要研究方向为天文仪器. Email: xcui@niaot.ac.cn

收稿日期: 2014-05-04; 录用日期: 2014-07-10

<http://www.photon.ac.cn>

响,使其成为地基天文观测的首要考核指标。

差分图像运动视宁度监测仪(Differential Image Motion Monitor, DIMM)通过统计恒星光波经瞳孔平面上双孔径所成像的相对运动,实时测量视宁度^[2]。DIMM是应用最广泛的视宁度测量设备,已被成功应用于欧洲南方天文台(European Southern Observatory, ESO Varge Telescope, VLT)选址及国际上许多优良台址和新选址。

DIMM问世以来,人们不断寻找提高其测量准确度的途径,其中对比试验是非常高效的手段^[3-4]。2004年8-10月,TMT选址组在托洛洛山美洲天文台(Cerro Tololo Inter-American Observatory, CTIO)对两台相同DIMM进行对比试验,结果表明在相同观测条件下,采用斯特尔比(Strehl Ratio)等标准过滤数据,两台DIMM的视宁度测量结果一致性很好^[3-4]。

丽江高美古2.4 m望远镜和盱眙近地天体探测望远镜的选址也使用了DIMM^[5]。云南天文台于1991年研制出我国首台DIMM,并应用于云南天文台视宁度测量^[6]。在我国西部选址中DIMM也是视宁度的主要测量设备^[7],并且西部选址组使用DIMM对大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)台址进行了考察,但是没有进行零曝光校正^[8]。中科院安徽光机所和中科院长春光机所也对DIMM进行了系统分析和改进^[9-10]。

鉴于大气光学湍流监测对天文台址建设的重要性,目前中科院国家天文台(National Astronomical Observatory of China, NAOC)南京天文光学技术研究所(南京天光所)已开展了DIMM视宁度测量方法的研究^[11-14]。2010年9月,在国家天文台兴隆观测站,南京天光所与国台西部选址组联合开展了DIMM对比测试和软硬件验证^[13]。2012年1月,南京天光所研制的南极Dome A DIMM成功安装在南极巡天望远镜上,并取得白天视宁度测量结果^[11]。

本文利用随机相位屏和光学离焦像差模拟差分图像运动,分析差分图像运动监测仪的测量准确度。然后,在国家天文台兴隆观测站,开展两台相同硬件配置的DIMM的对比实验,分析曝光时间的影响和测量结果的相关性。

1 工作原理及数值模拟

差分图像运动消除了外界因素的影响,是一种可靠的测量视宁度的方法。在忽略闪耀的条件下,波前到达角方向可以由G-tilt(Center-of-gravity tilt)和Z-tilt(Zernike tilt)表示。G-tilt可以由扰动波前的梯度来表示,而Z-tilt可以由扰动波前最佳拟合平面(或最小二乘拟合平面)的倾斜来表示。由于图像处理需要使用窗

口阈值探测星斑,所以DIMM探测到的星斑运动符合Z-tilt^[15]。

在DIMM数值模拟中,使用随机相位屏模拟地球大气的光学湍流对恒星光波波前的影响,使用Fresnel衍射模拟光波在自由空间传播,使用Fraunhofer衍射模拟DIMM双孔径成像。

1.1 工作原理

对于Z-tilt,经向和横向差分波前到达角方差满足

$$\sigma_d^2 = K\lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-1/3} \quad (1)$$

式中 D 为孔径直径, λ 为观测目标光学波长, r_0 为大气相干长度,常量 K 与测量方向为经向或横向有关,分别记为 K_1 和 K_2 ,其近似表达式为^[15]

$$K_1 = 0.364(1 - 0.532b^{-1/3} - 0.024b^{-7/3}) \quad (2)$$

$$K_2 = 0.364(1 - 0.798b^{-1/3} + 0.018b^{-7/3}) \quad (3)$$

式中 b 为孔径直径 D 与孔径间距 D_s 之比,所以视宁度

$$\epsilon_0 = \frac{0.98\lambda}{r_0} = 0.98(D/\lambda)^{0.2} (\sigma_d^2/K)^{0.6} (\sec \gamma)^{-0.6} \quad (4)$$

式中 γ 为观测目标天顶角。

1.2 数值模拟

采用修饰的快速傅里叶变换的随机相位屏生成方法,即子谐波快速傅里叶变换(Sub-Harmonic Fast Fourier Transform, FFT-SH)^[16]。FFT-SH利用子谐波添加低频信息,即在频率空间的零点附近,使用更小的频率间隔对相位波动的功率谱密度进行采样,所以包含有限孔径上大尺度相位波动的影响,即其生成的相位屏含有大气湍流的低频特性。图1为FFT-SH生成的相位屏,模拟条件:网格大小为 $G_x = G_y = 12.8$ m,采样阵为 $N_x = N_y = 4096$,视宁度 $\epsilon_0 = 1''$,子谐波数 $N_{sh} = 15$ 。

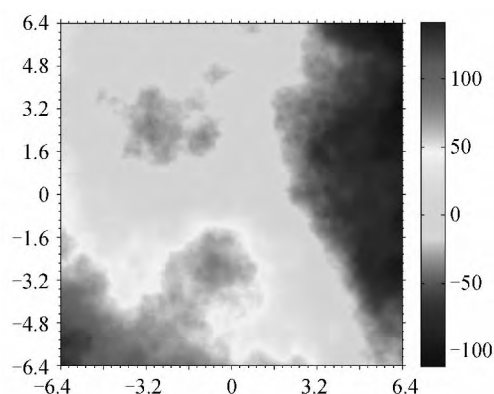


图1 FFT-SH生成的相位屏

Fig. 1 Phase screen generated by FFT-SH

使用Fresnel传递函数模拟光波在薄湍流层间传播,Fraunhofer衍射模拟DIMM双孔成像。图2为DIMM入瞳处恒星光波波前光强分布,其模拟输入条件:网格采样间隔为 $\Delta_x = \Delta_y = 0.0013$ m,采样阵为 $N_x = N_y = 800$,视宁度 $\epsilon_0 = 0.9''$,湍流分布服从Hufnagel模型,薄湍流层数 $N_{turb} = 8$,薄湍流层高度分布 $h = [17 \times$

$10^3, 15 \times 10^3, 12.5 \times 10^3, 10 \times 10^3, 7.5 \times 10^3, 5 \times 10^3, 2.5 \times 10^3, 0]$ m, DIMM 孔径直径 $D=0.1$ m, DIMM 孔径间距 $D_z=0.229$ m. 图 3 为 DIMM 焦平面处恒星图像, 其输入条件与图 2 相同, 附加焦距 $f=3.910$ m.

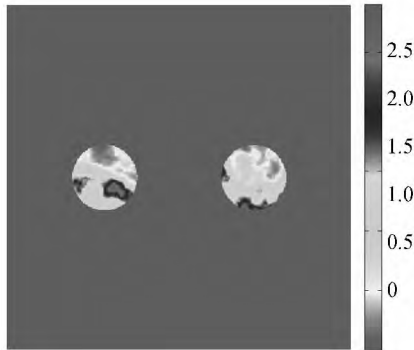


图 2 DIMM 入瞳处恒星光波光强分布
Fig. 2 Distribution of star light intensity at DIMM entrance pupil

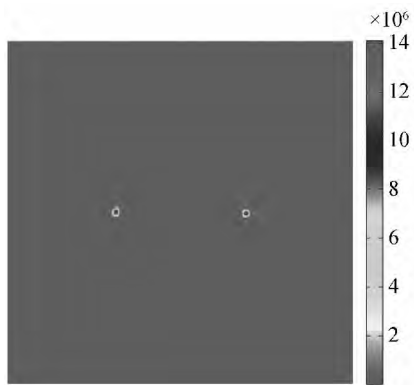
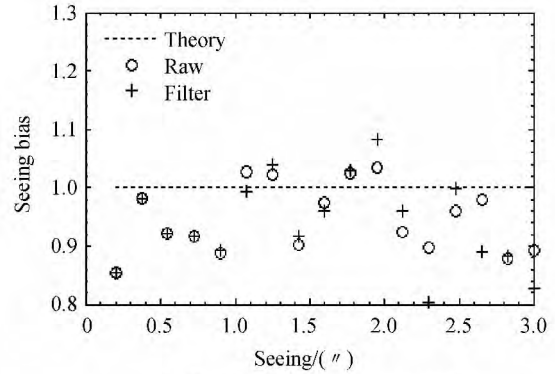


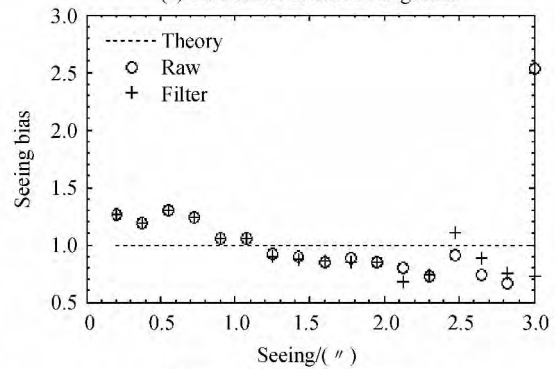
图 3 DIMM 焦平面处恒星图像
Fig. 3 Star images at DIMM focal plan

DIMM 的恒星图像主要由恒星光波经多层光学湍流生成的地面光波复振幅分布经 DIMM 系统生成恒星图像构成, 并且宽波段恒星图像是多窄波段恒星图像的叠加. DIMM 的测量准确度受到光波大气传输、质心算法、像差、曝光时间等影响^[4]. 本文中 DIMM 理论和模拟结果在近场条件下才成立. 图 4 为 DIMM 模拟结果, 其中输入主要条件^[4]: 单层湍流输入, 湍流层的平移速度为零; DIMM 光学系统像差只包含离焦项(相对离焦项, 其它像差项对 DIMM 测量误差的贡献量很小), 假设系统斯特列尔比为 0.8; 假设原始数据过滤条件只包括星斑椭圆比大于 0.4 和斯特列尔比大于 0.5. 图 4 的横轴表示模拟输入的理论视宁度, 其以 $0.175''$ 为步长, 从 $0.2''$ 到 $3.0''$. 对每一个理论视宁度进行 1000 次相同模拟, 模拟结果的平均值与理论视宁度值之比. 图 4(a) 表明 DIMM 测量地面处湍流的视宁度测量误差在 20% 左右. 图 4(b) 表明在近场条件下 DIMM 测量高空处湍流的视宁度测量误差在 40% 左右, 但是实际上 DIMM 对高空湍流的响应需考虑远场条件, 并对其对高空湍流的响应饱和(即相对近地面湍流,

DIMM 对高空湍流的响应小, 此时探测器噪音成为主导因素), 而且依赖于波长^[4]. 而 DIMM 对近地面湍流的响应满足近场条件, 所以能够可靠地测量近地面湍流.



(a) Turbulence locates near-ground



(b) Turbulence locates 10 km altitude

图 4 DIMM 数值模拟结果

Fig. 4 Results of DIMM numerical simulation

2 对比实验

2014 年 4 月 24~29 日夜, 在国家天文台兴隆观测站(离地面 5 m 高度, 周围有围挡)进行 DIMM 对比实验. 两台相同 DIMM 南北排列, 中心间距为 1 m, 实物见图 5. DIMM 硬件配置: 镜筒和赤道仪采用星特朗 CGE PRO 14 望远镜配置; 基线 $B=0.229$ m, 孔径直径

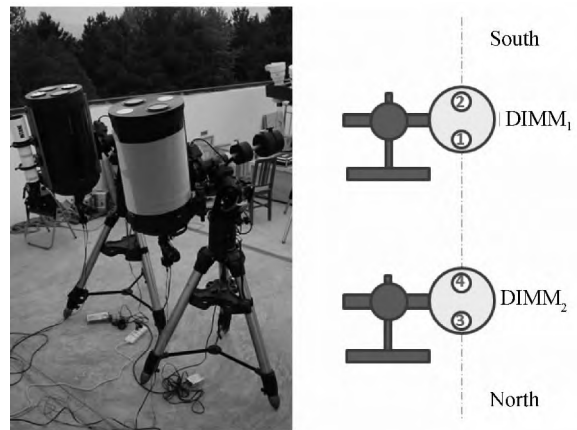


图 5 两台相同硬件配置的 DIMM 位于国家天文台兴隆观测站

Fig. 5 Two DIMMs with same hardware located at Xinglong Station of NAOC

$D=0.1\text{ m}$; CCD 为 JIA BM-141GE, 像素大小为 $0.3''$ (通过实测双星获得); 楔镜直径与孔径直径相同, 楔角为 $25''$. 实验使用 $0.5\ \mu\text{m}$ 光学波长计算视宁度, DIMM 单次累积时间为 1 min , CCD 长短曝光时间分别为 10 ms 和 5 ms . 视宁度测量结果首先进行零曝光校正, 然后利用式(4)进行天顶角校正.

DIMM 理论采用了无限短的曝光时间, 即在 DIMM 曝光时间内, 湍流是冻结的, 风速对湍流层产生的平移可以忽略. 但实际上 DIMM 曝光时间通常在 $5\sim 10\text{ ms}$, 在此时间内, 由风速引起的湍流层平移较显

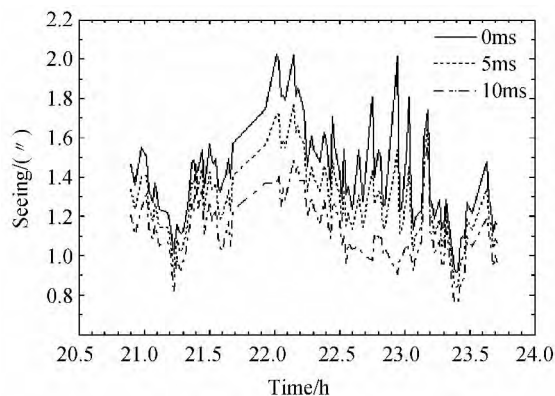


图 6 DIMM2 视宁度测量结果的时间趋势图
Fig. 6 Run chart for measurement results of DIMM2

著. 因此, 对于探测冻结的湍流, DIMM 曝光时间有时相对湍流的冻结时间太长, 所以需要 DIMM 测量的大气光学湍流参量进行曝光时间校正, 即零曝光校正^[15]. 使用交替曝光 (长曝光时间为短曝光时间的两倍) 下线性内插方法进行零曝光校正, 即 $p(0)=2p(\tau)-p(2\tau)$, 其中 τ 表示曝光时间, $p(0)$ 、 $p(\tau)$ 和 $p(2\tau)$ 分别表示零曝光、短曝光和长曝光情况下. 经向或横向差分波前到达角方差. 2014 年 4 月 26 日, 在国家天文台兴隆观测站, DIMM2 的 0 ms 曝光、 5 ms 曝光和 10 ms 曝光的视宁度趋势如图 6, 可知 DIMM 的有限曝光时间降低差分图像运动, 使视宁度值测量值偏小, 且缩短曝光时间可以减小误差.

两台 DIMM 利用外触发同步采集数据, 采用相同的算法后处理数据. 2014 年 4 月 24~26 日, 在国家天文台兴隆观测站, DIMM 测量结果如图 7, 两台 DIMM 监测视宁度的一致性很好, 如图 7(a) 上实线所示, 一致性斜率为 1.025, 虚线斜率为 1.2 和 0.8, 星点表示散点; 图 7(b) 中, 两台 DIMM 的测量结果和时间变化趋势一致 (只显示了 2014 年 4 月 26 日的数据); 图 7(c) 和 (d) 中, 最佳拟合对数正态分布得到 ϵ_0 中值、两台 DIMM 监测到的视宁度统计结果也一致, 视宁度对数中值和对数偏差都比较接近, 视宁度对数中值为 $1.3''$.

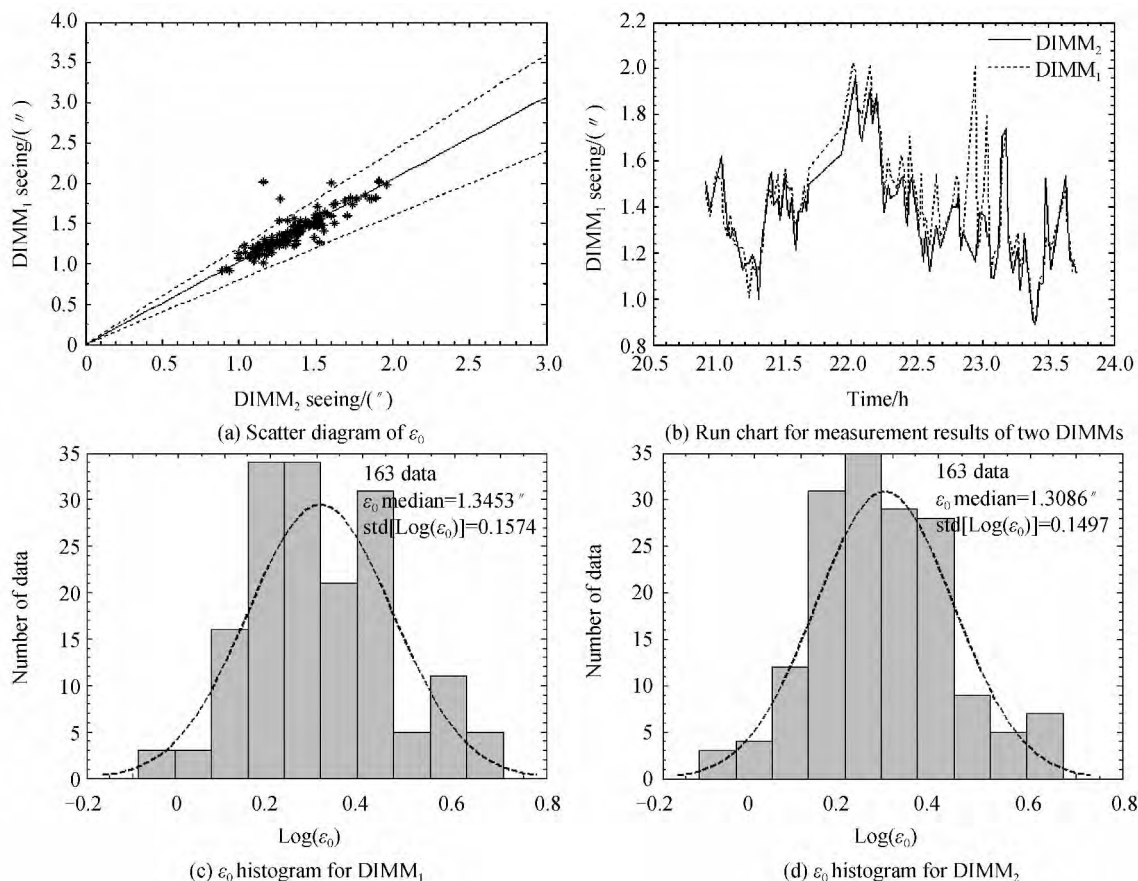


图 7 两台相同配置的 DIMM 同步采集和数据后处理获得的视宁度测量结果
Fig. 7 Seeing obtained by two same DIMMs with synchronous acquisition and post-processing data

两台 DIMM 同时监测视宁度,但是采集数据不同步,采用实时数据处理.2014 年 4 月 29 日,在国家天文台兴隆观测站,DIMM 的测量结果如图 8,两台 DIMM 监测视宁度的一致性很好,如图 8(a)上实线所示,一致性斜率为 0.986 2,虚线斜率为 1.2 和 0.8;图 8(b)中,

两台 DIMM 的测量结果和时间变化趋势一致;图 8(c)和(d)中,最佳拟合对数正态分布得到 ϵ_0 中值、两台 DIMM 监测到的视宁度统计结果也一致,视宁度对数中值和对数偏差都比较接近,视宁度对数中值为 $1.1''$.

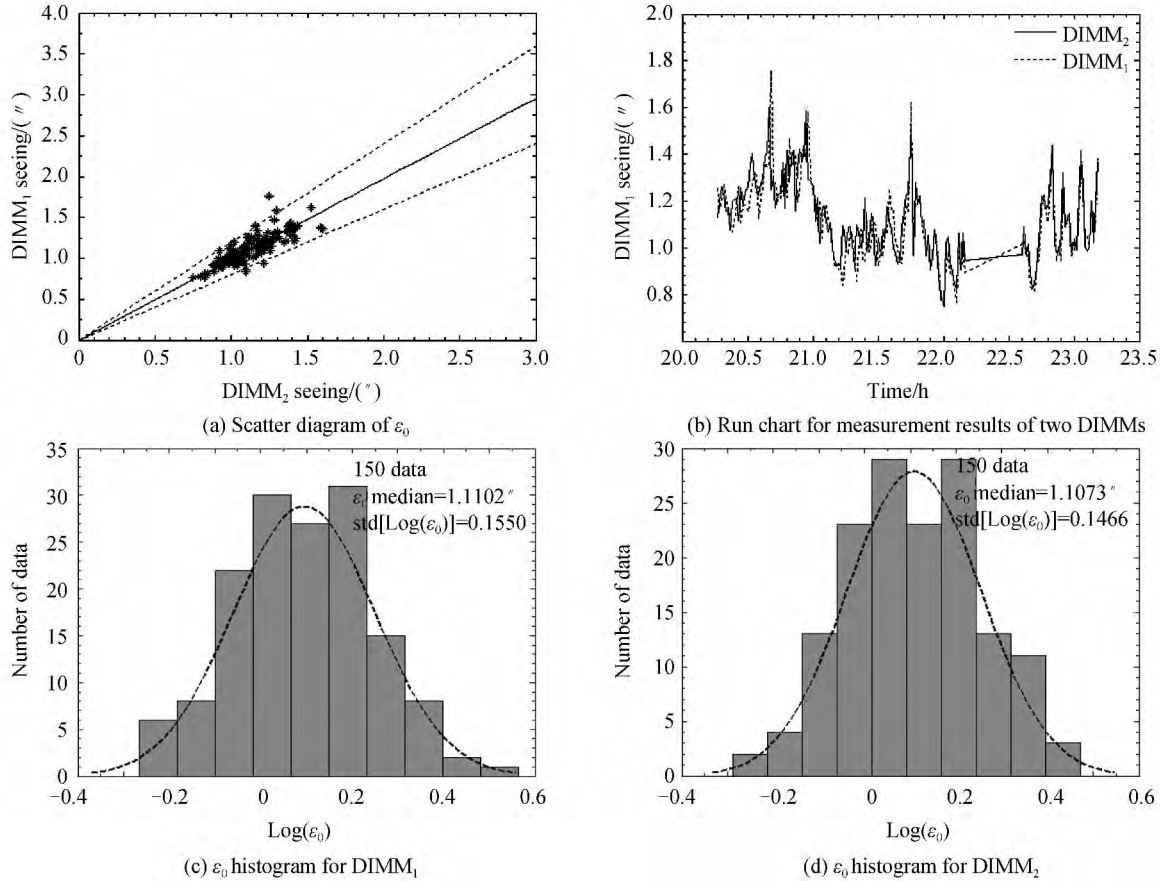


图 8 两台相同配置的 DIMM 非同步采集和实时数据处理获得的视宁度测量结果

Fig. 8 Seeing obtained by two same DIMMs with asynchronous acquisition and real-time processing data

3 结论

DIMM 的数值模拟表明 DIMM 能够可靠地测量地面湍流.在国家天文台兴隆观测站,开展两台相同硬件配置的差分图像运动监测仪的对比实验,结果表明:有限曝光时间降低差分图像运动,使视宁度测量值偏小;视宁度测量结果的时间变化趋势和统计结果一致性较好.因此差分图像运动监测仪的视宁度测量方法可靠且有效,能够为天文选址、台址监测和天文高分辨成像设备研制和运行等提供重要的视宁度数据.

参考文献

[1] RODDIER F. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy[J]. *Progress in Optics*, 1981, **19**: 281-376.
 [2] SARAZIN M, RODDIER F. The ESO differential image motion monitor[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1990, **227**: 294-300.
 [3] WANG Lian-qi, MATTHIAS S, GARY C, et al. High accuracy DIMM measurements for the TMT site testing program[C]. SPIE, 2006, **6267**: 62671S.
 [4] TOKOVININ A, KORNILOV V. Accurate seeing

measurements with MASS and DIMM[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, **381**(3): 1179-1189.
 [5] 中国科学院云南天文台. 选址与日冕观测组[EB/OL]. (2014-07-09) [2012-02-16]. <http://www.ynao.ac.cn/jgsz/kybm/xbtyxzd/jj/>.
 [6] 马琳. 便携式差分像运动大气视宁度监测仪的研制[M]. 中国科学院大学, 2007, 1-51.
 [7] 中国科学院国家天文台. 西部天文选址组[EB/OL]. (2014-07-09) [2013-12-17]. <http://sitesurvey.bao.ac.cn>.
 [8] LIU Li-yong, YAO Yong-qiang, WANG Yi-Ping, et al. Seeing measurements for the Guoshoujing Telescope (LAMOST) site with DIMM[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2010, **10**(10): 1061-1070.
 [9] HUANG Hong-hua, YAO Yong-bang, RAO Rui-zhong. 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,姚永帮,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.
 [10] CHEN Hao, XUAN Li, HU Li-fa, et al. Steady measurement of atmospheric turbulence coherence length[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(4): 911-918.
 陈浩,宣丽,胡立发,等. 大气相干长度的稳定测量[J]. *光学*

- 精密工程, 2013, **21**(4): 911-918.
- [11] PEI Chong, LI Zheng-yang, CHEN Hua-lin, *et al.* Preliminary daytime seeing monitoring at Antarctic Dome A [J]. *IAU*, 2012, **288**: 296-297.
- [12] PEI Chong, YUAN Xiang-yan, CHEN Hua-lin, *et al.* Development of automated small telescopes as Dome A Site testing DIMM[C]. *SPIE*, 2010, **7733**: 77334W1-8.
- [13] PEI Chong, YUAN Xiang-yan, CHEN Hua-lin, *et al.* Development of the first automated seeing monitor at Antarctic Dome A[J]. *Acta Astronomical Sinica*, 2011, **52**(5): 401-412.
裴冲,袁祥岩,陈华林,等. 南极冰穹 A 首台自动视宁度检测仪的研制[J]. *天文学报*, 2011, **52**(5): 401-412.
- [14] PEI Chong. Research of astronomical site testing technology of differential image motion and multi-aperture scintillation [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2013, 45-70.
裴冲. 天文选址差分图像运动和多孔径闪耀技术研究[D]. 中国科学院大学, 2013, 45-70.
- [15] TOKOVININ A. From differential image motion to seeing [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2002, **114**: 1156-1166.
- [16] JOHANSSON E M, GAVEL D T. Simulation of stellar speckle imaging[C]. *SPIE*, 1994, **2200**: 372-383.