

基于天气预报模式预报阿里天文站大气光学湍流

王红帅^{1,2} 姚永强¹ 刘立勇¹

(¹ 中国科学院国家天文台, 北京 100012; ² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 利用气象模式预报大气光学湍流, 能够使地基望远镜根据不同的大气视宁度条件, 选取相应的观测目标和终端设备, 还可以优化自适应光学系统性能和激光器打击目标的发射时机。介绍了采用天气预报模式建立的大气光学湍流预报方法。利用该预报方法, 采用数值和分析两种模型, 分别提前 3 d、2 d 和 1 d 预报出 2011 年 11 月 6 日夜间阿里天文站的气象参数、大气光学湍流强度 C_n^2 廓线和视宁度。共计 6 次的预报结果均显示近地面层、边界层 2 km 高度以及对流层 12 km 高度存在强湍流层。与单星闪烁测量层析(SICDAR)的实测数据对比结果表明, 本预报方法能够反映大气光学湍流廓线的结构特征。预报的视宁度反映出夜间的增大趋势和差分像运动视宁度仪(DIMM)实测结果相似。

关键词 大气光学; 光学湍流预报; 光学湍流廓线

中图分类号 P183.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0301006

Forecast of Atmosphere Optical Turbulence at Ali Site by Weather Research and Forecasting Model

Wang Hongshuai^{1,2} Yao Yongqiang¹ Liu Liyong¹

(¹ National Astronomical Observatories Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)
(² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The optical turbulence forecasting by meteorological model can provide fundamental information for the flexible scheduling of observation and instruments of ground-based telescope, optimized the performance of adaptive optics and the opportunity of destroying object by laser. An optical turbulence forecast system has been established with the weather research and forecasting model. Based on this system and two optical turbulence parameterization methods, numerical model and analytical model, the meteorological parameters, C_n^2 profiles and seeing at Ali site on November 06, 2011 are forecasted in advance on November 04, 05 and 06 respectively. Strong turbulence layers near ground, 2 km in boundary layer and 12 km in troposphere are discovered from the 6 forecasted results. The comparison between forecasted results and single star scintillation detection and ranging measurements shows that this forecasting system could provide the structure characteristics of C_n^2 profiles. It also could provide the increasing trend of seeing results over night, similar to the result with differential image motion monitoring.

Key words atmospheric optics; optical turbulence forecast; optical turbulence profile

OCIS codes 010.1330; 350.1260; 010.1290; 010.3920

1 引 言

大气湍流会影响望远镜的成像质量、光电导行精度^[1], 也会影响自由空间光通信系统的稳定性^[2]。光学湍流预报可以优化望远镜的观测表, 根据不同

的光学湍流条件来安排观测目标和终端设备。光学湍流预报还可以改善多层共轭自适应光学技术(MCAO)的性能, 根据预报的折射率结构常数 C_n^2 廓线调整变形镜的最佳位置, 扩大等晕区范围^[3]。

收稿日期: 2012-10-15; **收到修改稿日期**: 2012-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(11073031, 10903014)资助课题。

作者简介: 王红帅(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事天文选址和光学湍流预报等方面的研究。

E-mail: wanghs@nao.cas.cn

导师简介: 姚永强(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事天文选址、恒星形成和红外天文仪器等方面的研究。

E-mail: yqyao@nao.cas.cn

光学湍流预报在美国战略导弹防御系统中也得到了应用,通过预报机载激光器前方的光学湍流强度分布情况,使其选择最佳的发射时机和路径^[4]。

光学湍流预报是通过中尺度气象模式预报气象参数,再进一步由这些气象参数计算光学湍流参数。Masciadri 等^[5,6]分别给出了由气象参数计算光学湍流参数的数值模型和分析模型。目前较成熟的光学湍流预报系统是由 Businger 等^[7]建立的夏威夷莫纳克亚气象中心,主要负责为莫纳克亚天文台提供气象和光学湍流参数的预报。每天发布两次未来 5 d 的气象参数和光学湍流参数。目前,双子座北天望远镜有一半的观测时间采用常规模式,也就是按照之前提交观测计划书执行,另一半时间采用灵活的观测表,即根据预报的气象条件和光学湍流条件安排最合适的观测任务。

本文介绍利用气象天气预报模式(WRF)建立的大气光学湍流预报方法。该预报方法应用于青藏高原西部的阿里天文站,与实测的大气光学湍流廓线和视宁度进行了比较验证。

2 光学湍流预报方法

本光学湍流预报方法是利用 WRF 数值气象模式预报气象参数,再进一步计算光学湍流强度。WRF 是由美国环境预测中心(NCEP),美国国家大气研究中心(NCAR)等科研机构开发的下一代的中小尺度天气预报模式。WRF 模式为完全可压缩非静力模式。水平方向采用 Arakawa C 网格点,垂直方向采用地形跟随质量坐标。时间积分方面采用三阶或者四阶的 Runge-Kutta 算法。

WRF 模式运行在 Dell P410 型服务器上,该服务器有 2 个 4 核 CPU,4 G 内存,可以满足实验需求。模式采用 3 重双向嵌套。水平方向由外及内的网格分辨率分别为 25、5、1 km,网格数为 100×100 、 81×81 和 71×71 ,最内层中心位于目标站点;垂直方向从地面到 10 hPa 高度共分为 60 层。作为 WRF 模式初始条件和边界条件的数据采用全球预报系统(GFS)^[9]。GFS 是 NCEP 全球模式的预报结果,每 6 h 发布一次,空间分辨率为 1° ,时间分辨率为 3 h,高度分为 26 层,从 10~1000 hPa。GFS 可以从美国环境预测中心的匿名 ftp 上下载。WRF 模式的预报结果为 netcdf 格式的文件,每 10 min 一个数据。利用 NCL,awk,shell 等编程语言开发了后处理程序包,将计算的光学湍流参数结果保存为新的 netcdf 文件。

由于光学湍流的尺度远小于 WRF 模式中空间网格的大小,光学湍流强度需要用宏观的气象参数来表示,称为光学湍流参数化。在阿里站的预报实验中,采用两种光学湍流参数化模型。第一种是数值模型,Masciadri 等^[5]给出了计算大气光学湍流强度 C_n^2 的公式:

$$C_n^2 = 3.35 \times 10^{-6} P^{0.856} \theta^{-10/3} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^{4/3} e^{2/3}, \quad (1)$$

式中 P 为大气压强, θ 为位温, z 为高度, e 为湍流动能。

第二种称为分析模型,是由 Trinet 等^[6]在 2007 年基于 8 个天文台的 145 条探空气球数据,提出的新模型。先将温度结构常数用位温梯度和风剪切表示:

$$C_t^2 = \langle C_t^2 \rangle_m \frac{\chi}{\langle \chi \rangle_m} \left(\frac{S}{\langle S \rangle_m} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$\chi = \frac{d\theta}{dz}, \quad (3)$$

$$S = \sqrt{(dV_x/dz)^2 + (dV_y/dz)^2}, \quad (4)$$

式中 χ 为位温梯度, S 为风剪切, V_x, V_y 为水平风速, $\langle \rangle_m$ 表示同一高度所有实测数据的统计中值。然后通过(5)式^[8],由温度结构常数计算折射率结构常数:

$$C_n^2 = \left(\frac{80 \times 10^{-6} P}{T^2} \right)^2 C_t^2. \quad (5)$$

3 阿里站预报结果

阿里站位于西藏自治区阿里地区狮泉河镇以南 20 km,坐标(32.325°N,80.027°E),海拔 5100 m。前期天文选址的资料显示,青藏高原西部是世界上最好的台址之一^[9]。未来几年将会在阿里站持续的进行光学湍流参数监测,并开始建设一些中小型的望远镜项目。

为了验证该预报方法的效果,在阿里站进行了预报实验,并利用实测的大气光学湍流廓线进行验证。该实测数据是 2011 年 11 月 6 日夜间在阿里站进行的单星闪烁测量层析(SCIDAR)和差分像运动视宁度仪(DIMM)测量结果。基于该预报方法,分别使用 11 月 4 日、5 日和 6 日 20:00(北京时,下同)发布的 GFS,预报了 11 月 6 日夜间的气象参数和光学湍流参数。

图 1 为阿里站 10 m 高度风速预报结果与自动气象站(8 m)实测数据的对比。可以看出 11 月 6 日至 11 月 7 日,阿里站的实测风速比较小,在 1 m/s 左右,并且变化幅度不大。预报的结果要大一些,并

且变化幅度也相对较大。11月6日预报的结果比4日和5日更接近实测数据。风速的差别可能的原因包括在西藏输入数据精度相对较差,气象站旁边的圆顶的影响和WRF模式的分辨率较低(1 km)。

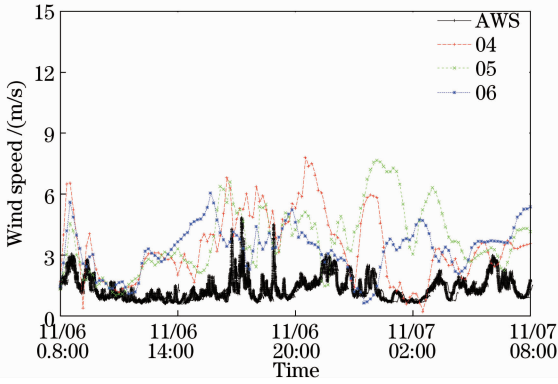


图1 阿里站的近地面风速。AWS表示自动气象站的数据,04、05、06分别表示11月4日、5日、6日预报的数据

Fig.1 Near ground wind speed at Ali site. AWS means the data by auto weather station, 04, 05, 06 mean forecast results at 04, 05 and 06 November respectively

图2为阿里站离地面2 m的预报气温与实测结果对比。可以看出预报的温度及其变化与实测结果都比较一致;夜间预报温度和实测温度的差异小于1℃;在16:00左右出现一天中的最高温度;19:00~20:00点之间,温度急剧降低;及至整个夜间,温度持续下降。从昼夜温度变化幅度来看,预报结果要小于实测结果。但从3次预报结果来看,11月6日的预报结果并不比4日和5日有所改进,夜间偏差甚

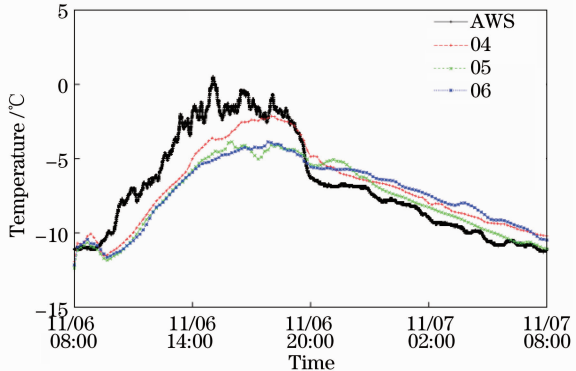


图2 阿里站的近地面气温。AWS表示自动气象站的数据,04、05、06分别表示11月4日、5日、6日预报的数据

Fig.2 Near ground temperature at Ali site. AWS means the data by auto weather station, 04, 05, 06 mean forecast results at 04, 05 and 06 November respectively

至更大。

图3为阿里站11月6日22:00到11月7日8:00的平均风廓线。可以看出,4日、5日和6日预报的风廓线都很一致。在近地面层,由于周边地形的影响,风速和风向随高度的变化比较剧烈。副热带急流出现在海拔12 km的高空,距地面的高度为7 km。近地面层之上,风速风向变化都相对比较稳定,风向逐渐由西北风转向西风。

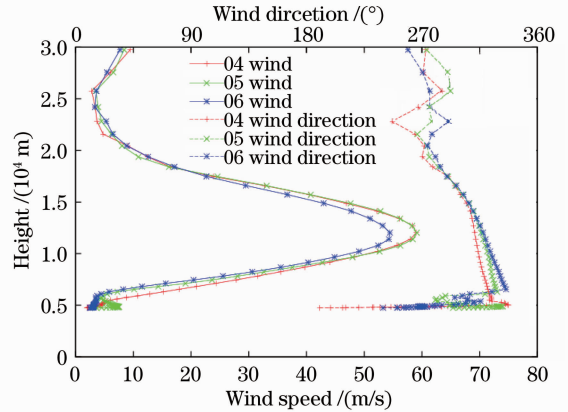


图3 阿里站的平均风速与风向廓线

Fig.3 Average wind speed and wind direction profiles at Ali site

图4为阿里站预报的11月6日22:00到11月7日8:00平均温度廓线。4日、5日和6日预报的平均温度廓线几乎重合,对流层顶位于海拔17 km左右,距地面约12 km。

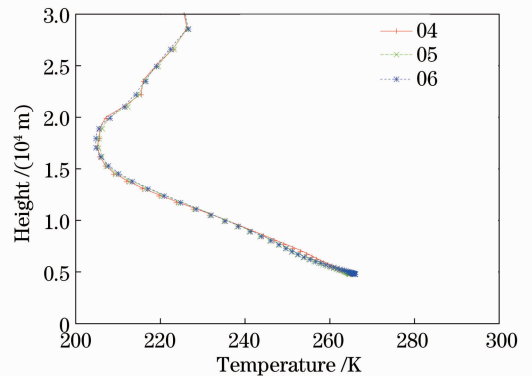


图4 阿里站的平均温度廓线。04、05、06分别表示11月4日、5日、6日预报的数据

Fig.4 Average temperature profiles at Ali site. 04, 05, 06 mean forecast results at 04, 05 and 06 November respectively

图5给出阿里站分别基于数值模型和分析模型预报的 C_n^2 廓线和单星SCIDAR在11月6日夜间的实测结果。这是第一次在青藏高原测量光学湍流廓线数据^[10]。对于每个模型,4日、5日和6日预报

的趋势都比较一致。两种模型之间 C_n^2 廓线结构特征也比较一致,强湍流层主要位于近地面、7 km 和 17 km(对流层顶)。由近地面至副热带急流层,分析模型 C_n^2 值大于数值模型;从副热带急流层到对流层顶,两种模型预报结果基本一致;对流层顶以上,分析模型 C_n^2 值小于数值模型。

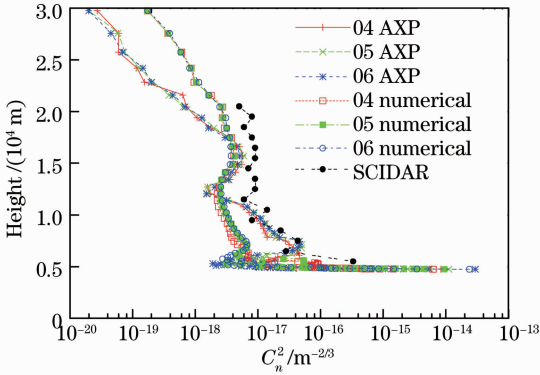


图 5 阿里站的平均 C_n^2 廓线。04、05、06 分别表示 11 月 4 日、5 日、6 日预报的数据。AXP 为分析模型, numerical 为数值模型

Fig. 5 Average C_n^2 profiles at Ali site. 04, 05, 06 mean forecast results on 04, 05 and 06 November respectively. AXP means analytical model, numerical means numerical model

副热带急流层以下,分析模型预报的 C_n^2 廓线与实测数据相符合。近地面及 7 km 高度的强湍流层都和实测结果一致, C_n^2 值也几乎相等。数值模型预报的 C_n^2 值小于实测值。副热带急流层之上,两种模型预报的 C_n^2 值都小于实测值。单星 SCIDAR 望远镜口径为 40 cm,能够探测的最大风速为 36 m/s 的大气层中的光学湍流^[11],阿里高空的风速要大于 36 m/s(图 3),因此高空湍流测量值也存在偏差。

图 6 为阿里站分别基于数值模型和分析模型预报的视宁度和 DIMM 实测视宁度。在 7 日 04:00 之前,DIMM 实测视宁度稳定在 0.5"左右,随后逐渐增加,达到 0.8"左右。两个模型共 6 次的预报都反应出这个增加的趋势,但在每个具体时刻,预报值和实测值还存在一些偏差,通常在 0.3"以内。

4 结 论

已有的实测结果表明,本文的预报方法可以在青藏高原西部预报气象参数和光学湍流参数。阿里站夜间温度的预报精度在 1 °C 左右,受输入数据精度和模型分辨率影响,近地面风速误差稍大。不同的预报时长所预报的气象参数和光学湍流参数,差

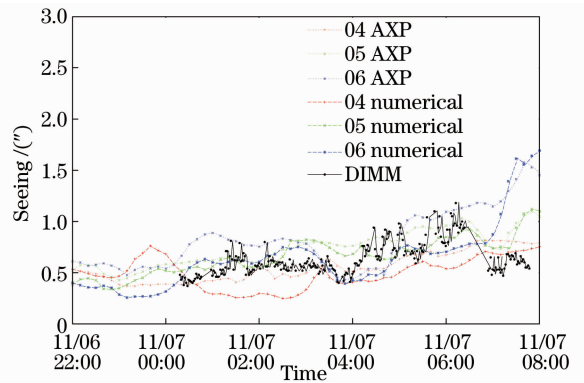


图 6 阿里站的 11 月 6 日晚的大气视宁度。04、05、06 分别表示 11 月 4 日、5 日、6 日预报的数据。AXP 为分析模型, numerical 为数值模型

Fig. 6 Seeing at Ali site on 06 November evening. 04, 05, 06 means forecast results on 04, 05 and 06 November respectively. AXP means analytical model, numerical means numerical model

异并不明显。基于不同预报时长的气象数据和两种光学湍流参数化模型,计算得到的 6 条 C_n^2 廓线结构特征具有相似性,都显示出近地面及 7 km 高度(距地面 2 km)有强湍流层,这一现象也被单星 SCIDAR 实测数据证实;分析模型的预报结果相对更接近实测数据。预报的视宁度值和 DIMM 实测视宁度值比较,都能够反映出视宁度整夜中的增加趋势。

气象模型计算的方法,在统计意义上可以很好地重建光学湍流廓线特征,但对于某个具体时刻,还无法准确预报视宁度值^[12]。建立成熟的预报方法,还需要诸多改进。目前所做的预报,没有将台址实测气象参数同化到模式的初始数据中。后续研究可在台址周围,布置一些自动气象站,将自动气象站采集的数据同化到模式中,应能提高预报的精度。

其次,基于未来几年长期的光学湍流实测数据,并结合各种天气过程、昼夜温差和地气温差等影响因素,还将针对阿里站的实际情况,逐步修正光学湍流参数计算。比如对于近地面层,采用 Monin-Obukhov 相似理论^[13],最终建立一个新的适合阿里站的光学湍流参数化模型,进一步提高该预报方法的预报精度。

此外,还需要实现预报方法的自动化,包括预报场数据下载、WRF 模式的自动运行、运行结果的后处理、预报结果的自动发布和故障排除等。提高硬件运行能力及速度,能够在 2~3 h 之内完成一个台址 30 h 的光学湍流参数预报,从而开展常态化的预报工作。

参 考 文 献

- 1 Liu Guangqian, Yang Lei, Deng Linhua *et al.*. Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of astronomical telescope auto-guiding system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(1): 0101002
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
- 2 Li Fei, Wu Yi, Hou Zaihong. Analysis and experimental research on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0606002
李菲, 吴毅, 侯再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0606002
- 3 E. Masciadri, S. Egner. First seasonal study of optical turbulence with an atmospheric model [J]. *Astronomical Society of the Pacific*, 2006, **118**(849): 1604~1619
- 4 R. Lefevre, F. Ruggiero, K. Roe. Impacts of numerical weather prediction spatial resolution on an atmospheric decision aid for directed energy weapon systems [J]. *IEEE*, 2003. 270~274
- 5 E. Masciadri, P. Jabouille. Improvements in the optical turbulence parameterization for 3D simulations in a region around a telescope [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2001, **376**(2): 727~734
- 6 H. Trinquet, J. Vernin. A statistical model to forecast the profile of the index structure constant C_n^2 [J]. *Environ. Fluid Mech.*, 2007, **7**(5): 397~407
- 7 S. Businger, T. Cherubini. *Seeing Clearly* [M]. TX, USA: Visualbookworm.com Publishing Inc, 2011. 123~123
- 8 C Coulman. Fundamental and applied aspects of astronomical 'seeing' [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1985, **23**: 19~57
- 9 R Stone. World-class observatory rising on roof of the world [J]. *Science*, 2012, **337**(6099): 1156~1157
- 10 L. Liu, Y. Yao, J. Vernin *et al.*. Atmospheric turbulence measurements at Ali observatory, Tibet [C]. *SPIE*, 2012, **8444**: 844464
- 11 A. Habib, J. Vernin, Z. Benkhaldoun. Single star scidar: atmospheric parameters profiling using the simulated annealing algorithm [J]. *Monthly Notice Royal Astronomy Society*, 2006, **368**(3): 1456~1462
- 12 E. Masciadri. Optical turbulence forecast: toward a new era of ground-based astronomy [C]. *SPIE*, 2006, **6267**: 62671C
- 13 Wu Xiaqing, Zhu Xingting, Huang Honghua *et al.*. Optical turbulence of atmosphere surface layer estimated based on the Monin-Obukhov similarity theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0701004
吴晓庆, 朱行听, 黄宏华等. 基于 Monin-Obukhov 相似理论估算近地面光学湍流强度[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0701004

栏目编辑: 王晓琰