

WRF模式估算丽江高美古大气光学湍流廓线

青 春^{1,2} 吴晓庆¹ 李学彬¹ 朱文越¹ 饶瑞中^{1,3} 梅海平¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031

³中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026

摘要 光波在大气中传输时,由于湍流的存在导致相位扰动造成光电系统的成像质量下降。自适应光学系统用于校正湍流的影响,但优化自适应光学系统性能以及大型望远镜在选址、设计和运行时都需要监测台址的光学湍流强度及其积分参数。测量高空大气光学湍流需要耗费巨大的人力、物力和财力,并且由于测量方法的限制难以在全国大范围连续地测量。介绍了基于数值天气预报(WRF)模式,依据湍流参数化模型模拟得到光学湍流强度廓线。模拟结果与在高美古观测站探空实测数据进行了对比,结果表明模拟的光学湍流强度廓线展现了高空大气光学湍流廓线的变化特征,与实测结果基本一致。

关键词 大气光学; 湍流廓线; 数值天气预报模式; 参数化; 探空

中图分类号 O437.5 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0913001

Estimation of Atmospheric Optical Turbulence Profile by WRF Model at Gaomeigu

Qing Chun^{1,2} Wu Xiaoqing¹ Li Xuebin¹ Zhu Wenyue¹ Rao Ruizhong^{1,3} Mei Haiping¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

³School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract When electromagnetic waves propagate through the atmosphere, the turbulence causes phase fluctuations and degrades the image quality of the photoelectric system. Adaptive optics is used to correct the effect of atmospheric turbulence, but in order to optimize system performance, as well as the large telescope sitting, designing and operating, monitoring optical turbulence intensity and integral parameters of the observing stations are necessary. Measuring atmospheric optical turbulence takes a huge labor, materials and financial resources, and it is difficult to measure a large region continuously. The weather research and forecasting (WRF) model is introduced based on the optical turbulence parameterization, the profiles of the optical turbulence intensity are simulated using turbulence parameterized model. Simulation results are compared with measurements at Gaomeigu observing station, the results show that the simulation profiles emerge the variation tendency of the upper air atmospheric optical turbulence, and basically coincide with the measurements.

Key words atmospheric optics; turbulence profile; numerical weather forecasting model; parameterization; balloon

OCIS codes 010.1290; 010.1330; 030.4070; 060.4510

收稿日期: 2015-05-18; 收到修改稿日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(41275020)

作者简介: 青春(1987—),男,博士研究生,主要从事大气湍流的参数化与模式预报方面的研究。

E-mail: chunqing@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 吴晓庆(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事大气边界层、大气湍流测量与模式、天文选址等方面的研究。E-mail: xqwu@aiofm.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

光波在大气中传输时,受到大气湍流的影响而产生各种效应,如闪烁、到达角起伏等,从而影响光电系统的成像质量以及空间光通信的稳定性^[1-4]。天文观测站在选址、设计和运行时都需要考虑大气湍流对望远镜光电性能的影响^[5-6]。折射率结构常数 C_n^2 是表征大气光学湍流强度的重要参数。过去发展了较多的测量方法,但由于测量方法的局限想要通过实际测量手段获得较大时空范围内的大气湍流参数不切实际。因此依据常规气象参数模拟和预报大气光学湍流具有重要意义。

大气湍流是大气随机运动的结果,其形成和变化都与常规气象参数有着密不可分的联系,国内外对大气光学湍流的参数模式进行了大量的研究。Hufnagel等^[7]基于星光闪烁和气球探空测量数据归纳出高空大气湍流参数模式,此模式尽管考虑了气象要素的影响,但单纯用风速平方平均不能反映大气湍流的复杂性和多样性。Warnock等^[8]在对小尺度和风切变的统计模式基础上开发了美国国家海洋和大气管理局(NOAA)模式,利用无线电探空得到的标准气象参数估算大气光学湍流强度廓线。Bougeault等^[9]在1995年最早尝试将中尺度气象模式模拟大气光学湍流应用到天文学上。Masciadri等^[10-11]基于非静力学气象模式获得了三维大气光学湍流分布,水平分辨率达到了500 m。目前在夏威夷莫纳克亚气象中心,建立了较为成熟的大气光学湍流模拟预报系统,为莫纳克亚天文台每天两次发布未来5天的常规气象参数和大气光学湍流参数的预报结果^[12]。许利明等^[13-14]利用中尺度气象模式获得了合肥、库尔勒、东山等地的大气光学湍流强度廓线。王红帅等^[15-16]尝试将大气光学湍流预报的研究成果运用到天文选址工作中。

本文介绍了利用气象数值预报(WRF)模式,依据大气光学湍流的参数化方案模拟了云南高美古天文观测站大气光学湍流强度廓线,并与探空实测数据进行了对比验证。

2 C_n^2 测量原理

在局地均匀各向同性湍流的假定下,折射率结构函数 $D_n(\mathbf{r})$ 定义为 $D_n(\mathbf{r}) = \langle [n(\mathbf{x}) - n(\mathbf{x} + \mathbf{r})]^2 \rangle$ ^[17], $D_n(\mathbf{r})$ 与空间两点间距离 r 存在如下关系:

$$D_n(\mathbf{r}) = C_n^2 r^{2/3}, l_0 \ll r \ll L_0, \quad (1)$$

式中 \mathbf{x} 和 \mathbf{r} 是位置矢量, r 是 \mathbf{r} 的模, $\langle \cdot \rangle$ 表示系综平均, C_n^2 是折射率结构常数, l_0 和 L_0 分别是湍流的内尺度和外尺度。温度结构常数 C_T^2 的表示形式与 C_n^2 相同,把折射率 n 换成温度 T 即可

$$C_T^2 = \langle [T(\mathbf{x}) - T(\mathbf{x} + \mathbf{r})]^2 \rangle r^{-2/3}. \quad (2)$$

对于可见光和近红外光波,折射率起伏主要是由温度起伏引起的。因此 C_n^2 可直接由温度结构常数 C_T^2 得到

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2} \right)^2 C_T^2, \quad (3)$$

式中 P 为气压,单位为 hPa。

两个相距为 1 m 的微温探头将空间两点环境温度的变化感应为电阻值的变化,经不平衡电桥转换为电压的变化,从电压放大器输出的电压变化 ΔV 对应一定的温度变化 ΔT , A 是标定系数,则有

$$\Delta V = A \cdot \Delta T. \quad (4)$$

由(2)、(4)式通过测量空间两点温差的平方平均得到 C_T^2 ,再由(3)式求得折射率结构常数 C_n^2 。

3 模拟方法

3.1 模式简介

数值天气预报模式是由美国国家大气研究中心(NCAR)和美国国家环境预测中心(NCEP)共同联合开发的中尺度非静力学天气预报模式。WRF为完全可压缩,具有静力选项的非静力学模式。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。在时间积分方面采用3阶或4阶的 Runge-Kutta 算法。WRF模式依据大气运动闭合基本方程组,即运动方程、连续方程、状态方程、热力学方程、水汽方程。在 σ 坐标系下基本方程组为^[18]

$$\left(\frac{d\mathbf{V}_h}{dt}\right)_\sigma = -\nabla_\sigma \Phi - \sigma \alpha \nabla p^* - f \mathbf{k} \times \mathbf{V}_h + \mathbf{F}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} + p^* \alpha = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} + \nabla_\sigma \cdot (p^* \mathbf{V}_h) + \sigma \frac{\partial p^*}{\partial \sigma} = 0, \quad (7)$$

$$p^* \sigma = -\int_0^\sigma \nabla_\sigma \cdot (p^* \mathbf{V}_h) d\sigma - \rho \frac{\partial p^*}{\partial t}, \quad (8)$$

$$C_p \frac{dT}{dt} - \alpha \left(\sigma \frac{dp^*}{dt} + p^* \sigma \right) = Q, \quad \alpha = \frac{RT}{\sigma p^* + p_\tau}, \quad (9)$$

式中 $\sigma = \frac{p - p_\tau}{p_s - p_\tau} = \frac{p - p_\tau}{p^*}$, 其中 p_s 是场面气压, p_τ 是上边界面气压, ∇ 为求梯度算符, \times 表示矢量乘, ∇_σ 为在等 σ 面上的梯度, α 为比容, p 为气压, \mathbf{k} 为 z 方向单位矢量, ρ 为密度, Φ 为位势, \mathbf{F} 为摩擦力, t 为时间, f 为地转系数, \mathbf{V}_h 为风速矢量, C_p 为定压比热, Q 为非绝热过程的加热率, R 为干空气比气体常数。

WRF 模式主要分为 3 个模块,其结构如图 1 所示。WRF 模式的前处理系统(WPS)主要作用是定义模拟区域、插值地形资料到模拟区域;WRF 模块中的 real 程序把气象要素场垂直方向插值到垂直层,WPS 系统为 WRF 模式主程序提供了初始和边界条件;WRF 模式后处理系统(WPP)的功能是把模式垂直坐标插值到标准输出层、把预报网格插值到正常网格、计算诊断输出量等。驱动模式运转输入的数据有再分析场数据(FNL)、预报场数据(GFS)以及客观格点资料(OBSGRID)等。数据同化分析(WRFDA)、高级研究版本(ARW)核心等构成了 WRF 模式的主体。交互式数据语言(IDV)、海洋大气研究可视化分析平台(VAPOR)以及美国国家大气研究中心开发的语言(NCL)是可选的模式后处理程序。

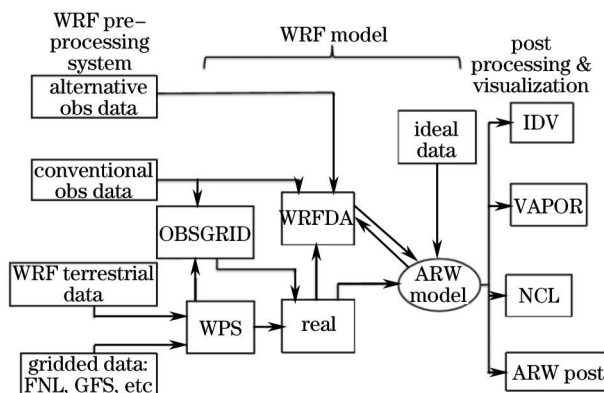


图 1 WRF 模式结构

Fig.1 WRF model structure

WPS 模块是顺利运行 WRF 模式的基础。WPS 由 3 个程序组成,如图 2 所示。geogrid 程序确定模拟区域并把静态地形数据插值到格点上;ungrib 程序从 GRIB 格式的数据中提取气象要素场;metgrid 程序则是把提

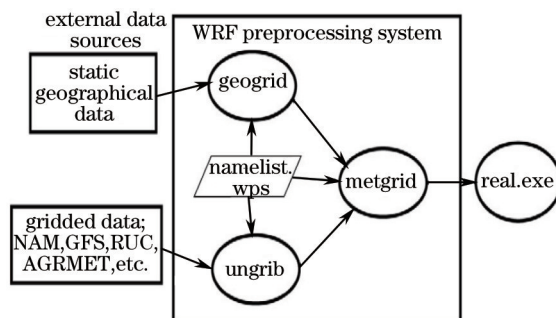


图 2 WPS 模块图

Fig.2 WRF preprocessing system module

取出的气象要素场水平插值到由 geogrid 程序确定的网格点上。

采用 Lenovo Product 系列台式计算机,英特尔酷睿第 3 代 i7 处理器,4 G 内存和 1 T 容量硬盘。操作系统采用 Linux 架构下的 Ubuntu(10.04 LTS)。经过前期多次模拟实验,WRF 模式运行正常,计算机配置满足基本需求。

模拟区域中心选择中国科学院云南天文台丽江高美古观测站(26.69°N,100.03°E),海拔 3227 m。嵌套区域设为 3 重网格嵌套,东西方向格点数从外到内分别为 65、91、124;南北方向格点数从外到内分别为 49、61、97;网格分辨率从外到内分别为 36、12、4 km;静态地形数据(GEOG)的分辨率为 10'、5'、2';投影方式采用 lambert 正型投影;模式输入的数据为 FNL 数据,其分辨率为 1°×1°。模式顶层气压设置为 10 hPa;垂直方向分为 96 层;网格积分步长为 180 s。为了和探空气球释放时间对应,模拟时间从 2013 年 4 月 6 日 00:00UTC 到 2013 年 4 月 25 日 00:00UTC。由于时间跨度大消耗计算机较大资源,因此将模拟分为 3 段进行,每 1 h 输出 1 次模拟结果。

3.2 光学湍流参数化

根据湍流局地均匀各向同性理论,Tatarski^[19]推导出了大气折射率结构常数与气象参数以及外尺度之间的关系为

$$C_n^2 = aL_0^{4/3} M^2, \quad (10)$$

$$M = -\frac{79 \times 10^{-6} P}{T^2} \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (11)$$

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286}, \quad (12)$$

式中 a 为常数,一般取 2.8, θ 为位温,单位是 K, z 为海拔高度,单位是 m, M 为位势折射率梯度。由此可见, C_n^2 与外尺度 L_0 、气温和气压有关,此外合适的外尺度模式对计算结果的精度起着至关重要的作用^[20]。

Jackson 和 Reynolds 提出的外尺度模式^[21],将外尺度与高空的风切变以及温度梯度联系起来:

$$L_0^{4/3} = \begin{cases} 0.1^{4/3} \times 10^{0.362 + 16.728S - 192.347 \frac{dT}{dz}}, & \text{troposphere} \\ 0.1^{4/3} \times 10^{0.757 + 13.819S - 57.784 \frac{dT}{dz}}, & \text{stratosphere} \end{cases}, \quad (13)$$

$$S = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (14)$$

式中 u 、 v 是纬向和经向风速,单位是 m/s, S 为风切变。

4 模拟结果

4.1 常规气象参数对比

所研制的湍流气象探空仪在云南丽江高美古观测站进行实地放球测量。微温传感器测量的 C_r^2 统计平均时间为 3 s,直径 20 μm 的铂丝响应频率为 0.1~20.0 Hz,系统噪声为 0.002 $^\circ\text{C}$,上升最大高度约 32 km。探空仪有效载荷 1.5 kg,距气球 50 m,这是为了避免气球上升时扰动可能产生的影响^[22]。表 1 为所选择的 3 个不同时段的探空测量记录,时间格式为北京时间。1 号球为中午时段;2 号球为清晨时段;3 号球为晚间时段。图 3 和图 4 分别是模拟与实测的温度、风速廓线图。

表 1 高美古探空测量记录

Table 1 Record of all balloons measurement in Gaomeigu

Balloon number	Release date	Release time (Beijing)	Termination altitude time (Beijing)	Release altitude /m	Termination altitude /m
1	Apr.6	11:11:37	12:36:15	3227	30148
2	Apr.14	05:17:34	07:14:08	3227	32467
3	Apr.23	21:07:49	22:54:27	3227	31383

由图 3 可以看出模拟的温度与实测符合得较好,两者的相关性分别达到了 93.5%、96.7%、98.9%。对对流层顶均出现在海拔 17 km 左右,图 3(a)在海拔 7 km 左右温度出现微小波动。

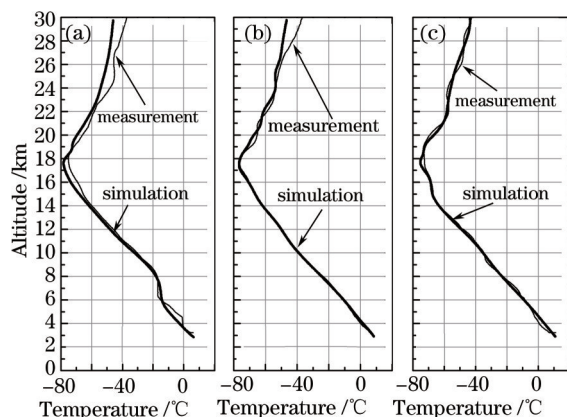


图3 模拟与实测的温度廓线。(a) 2013年4月6日中午; (b) 2013年4月14日清晨; (c) 2013年4月23日夜
 Fig.3 Simulated and measured temperature profiles. (a) Midday of 2013-04-06; (b) early morning of 2013-04-14; (c) night of 2013-04-23

在近地面层由于周围地形的影响,风速随高度的变化较为剧烈。在近地面层之上,风速变化稳定。图4为模拟的风速与实测风速廓线图,两者的相关性分别达到了96.73%、94.74%、92.44%。在海拔10~14 km风速相对较大,4月6日中午风速较大的区域最宽,4月14日清晨最窄。风速最大值均出现在海拔12 km,约50 m/s。

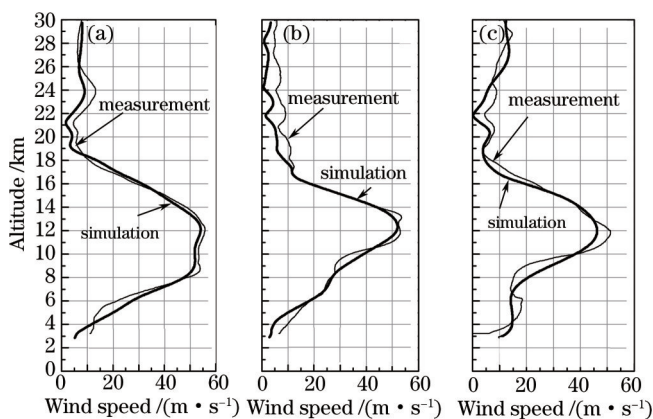


图4 模拟与实测的风速廓线。(a) 2013年4月6日中午; (b) 2013年4月14日清晨; (c) 2013年4月23日夜
 Fig.4 Simulated and measured wind speed profiles. (a) Midday of 2013-04-06; (b) early morning of 2013-04-14; (c) night of 2013-04-23

4.2 C_n^2 廓线对比

利用上述模拟得到的常规气象参数,依据大气光学湍流参数化模型计算 C_n^2 。图5为模拟的 C_n^2 廓线与实测结果对比,可以看出两者整体趋势和量级基本一致,相关性分别达到了76.43%、86.54%、78.77%。强湍

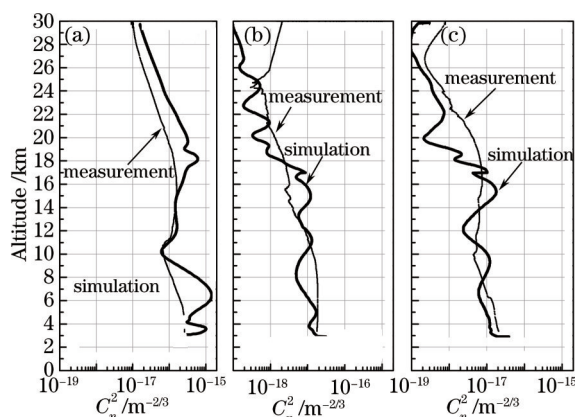


图5 模拟与实测的 C_n^2 廓线。(a) 2013年4月6日中午; (b) 2013年4月14日清晨; (c) 2013年4月23日夜
 Fig.5 Simulated and measured C_n^2 profiles. (a) Midday of 2013-04-06; (b) early morning of 2013-04-14; (c) night of 2013-04-23

流薄层都出现在地表附近的近地面层以及海拔 15 km 左右的对流层顶,4月6日中午模拟值起伏比实测稍大。在图5中的3个时段,中午时段的 C_n^2 值最大并且随高度变化特征明显;清晨时段的 C_n^2 最小,随高度变化特征不明显;夜晚时段的 C_n^2 大小和清晨差别不大,但随高度变化特征相当明显。

4.3 C_n^2 廓线特征分析

大气光学湍流通常在地表附近的近地面层最强,并随高度按指数递减。在稳定的大气背景条件下低平流层常出现较强的湍流薄层,往往是由于冷暖空气交汇、强对流天气等扰动源在温度分层和风速切变等不稳定条件下发展成湍流^[23]。Richardson 数用来表征温度分层和风速切变对湍流发展的影响,可表示为

$$R_i = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta/dz}{(dV/dz)^2}, \quad (15)$$

式中 g 是重力加速度, V 是风速,单位是 m/s。当 $R_i < 0.25$ 时,大气处于不稳定状态,产生湍流。通常 R_i 值很大,因此常用 Richardson 数的倒数表示。图 6~8 分别是 2013 年 4 月 6 日中午、14 日清晨和 23 日夜间风切变、Richardson 数的倒数、温度梯度和 C_n^2 廓线图。

Jackson 和 Reynolds 将外尺度与高空的风切变以及温度梯度联系起来具有重要实际意义。如图 6 所示,在风切变和温度梯度起伏较大时出现强湍流薄层。尽管 Richardson 数的倒数没有出现大于 4 的情形,但在其峰值处对应着强湍流薄层。

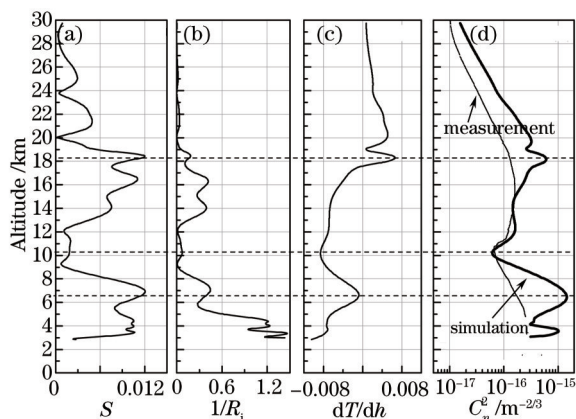


图 6 2013 年 4 月 6 日中午高美古(a)风切变、(b)1/Ri、(c)温度梯度和(d) C_n^2 廓线

Fig.6 Profiles of (a) windshear, (b) $1/R_i$, (c) temperature gradient and (d) C_n^2 in midday of 2013-04-06 at Gaomeigu

图 7 为 2013 年 4 月 14 日清晨高美古风切变、 $1/R_i$ 、温度梯度和 C_n^2 廓线图,在风切变和 Richardson 数的倒数起伏较大时对应着强湍流薄层的现象较明显。温度梯度在海拔 17 km 以下波动不明显,对应着湍流波动也不明显;温度梯度在 17 km 以上比在 17 km 以下略小,湍流同样也较弱。

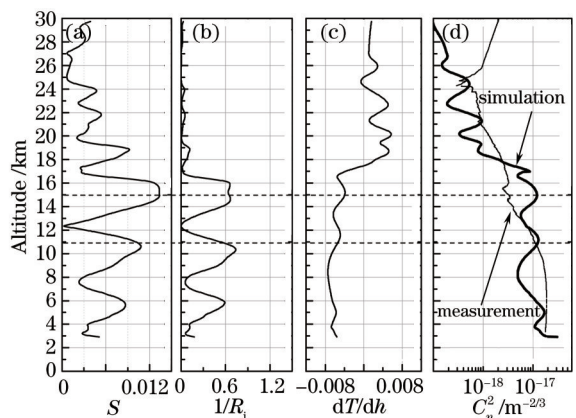


图 7 2013 年 4 月 14 日清晨高美古(a)风切变、(b)1/Ri、(c)温度梯度和(d) C_n^2 廓线

Fig.7 Profiles of (a) wind shear, (b) $1/R_i$, (c) temperature gradient and (d) C_n^2 in early morning of 2013-04-14 at Gaomeigu

图 8 为 2013 年 4 月 23 日清晨高美古风切变、 $1/R_i$ 、温度梯度和 C_n^2 廓线图,在风切变和 Richardson 数的倒

数起伏较大时,对应着强湍流薄层的现象更加明显。通过图6~8的对比可以看出基本上都是在风切变、Richardson数的倒数、温度梯度等起伏较大时出现强湍流薄层。

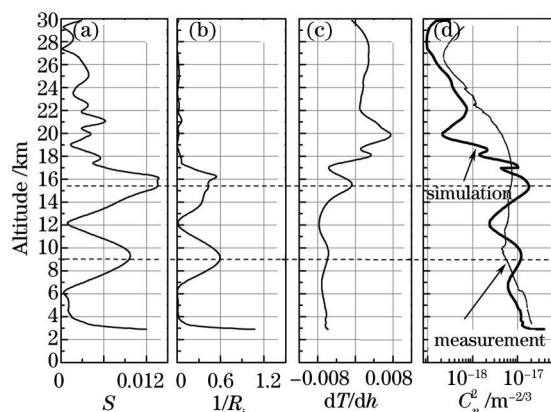


图8 2013年4月23日夜间高美古(a)风切变、(b)1/Ri、(c)温度梯度和(d) C_n^2 廓线

Fig.8 Profiles of (a) wind shear, (b) $1/R_i$, (c) temperature gradient and (d) C_n^2 in night of 2013-04-23 at Gaomeigu

5 结 论

介绍了基于WRF模拟大气光学湍流强度廓线的方法。通过不同时段模拟结果与实测结果的对比可得出以下结论:

- 1) 模拟的 C_n^2 廓线展现了高空大气光学湍流的变化特征和规律,廓线整体形状与实测基本一致,但精细形状存在偏差;
- 2) 中午时段的 C_n^2 值最大并且随高度变化特征明显;清晨时段的 C_n^2 最小,随高度变化特征不明显,夜晚时段的 C_n^2 大小和清晨差别不大,但随高度变化特征较为明显;
- 3) 驱动模式运转采用了FNL数据,若采用GFS数据则能够模拟预报未来一段时长的的大气光学湍流强度,并结合整层大气光学湍流积分效应,因此具有重要的实际工程应用价值;
- 4) 湍流局地均匀各向同性理论以及外尺度模式可能并不完善,提出适合中国高空大气的外尺度模式以及改进光学湍流参数化模型对提高模拟精度具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- 2 Rao Ruizhong, Li Yujie. Light propagation through non-Kolmogorov-type atmospheric turbulence and its effects on optical engineering [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501003.
饶瑞中, 李玉杰. 非Kolmogorov大气湍流中的光传播及其对光电工程的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501003.
- 3 Wu Xiaoqing, Huang Yinbo, Mei Haiping, et al.. Measurement of non-Kolmogorov turbulence characteristic parameter in atmospheric surface layer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0601001.
吴晓庆, 黄印博, 梅海平, 等. 近地面层大气非Kolmogorov湍流特征参数测量[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0601001.
- 4 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.
- 5 Liu Guangqian, Yang Lei, Deng Linhua, et al.. Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of astronomic 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.
- 6 Zhang Caiyun, Weng Ningquan. Research on the characteristic of clear-day dynamic turbulence in troposphere based on wind profile radar[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1213003.
张彩云, 翁宁泉. 基于风廓线雷达的晴空对流层动力湍流特征研究[J]. 中国激光, 2013,40(12): 1213003.

- 7 Hufnagel R, Stanley N R. Modulation transfer function associated with image transmission through turbulent media[J]. J Opt Soc Am, 1964, 54(1): 52-60.
- 8 Warnock J M, VanZandt T E. A statistical model to estimate the refractivity turbulence structure constant C_n^2 in the free atmosphere [C]. NOAA Technical Memorandum ERL AL-10, Aeronomy Laboratory Boulder, 1985, 20: 1-15.
- 9 Bougeault P, Hui C De, Fleury B, *et al.*. Investigation of seeing by means of an atmospheric mesoscale numerical simulation[J]. Appl Opt, 1995, 34(18): 3481-3488.
- 10 Masciadri E, Jabouille P. Improvements in the optical turbulence parameterization for 3D simulations in a region around a telescope [J]. Astronomy & Astrophysics, 2001, 376 (2): 727-734.
- 11 Masciadri E, Vernin J, Bougeault P. 3D mapping of optical turbulence using an atmospheric numerical model. I. A useful tool for the ground-based astronomy[J]. Astronomy & Astrophysics Supplement Series, 1999, 137(1): 185-202.
- 12 T Cherubini, S Businger, R Lyaman, *et al.*. Modeling optical turbulence and seeing over Mauna Kea[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(4): 1140-1155.
- 13 Xu Liming, Wu Xiaoqing, Wang Yingjian. Forecast optical turbulence with mesoscale weather forecast model[J]. Journal of Atmospheric and Environment Optics, 2008, 3(4): 270-275.
许利明, 吴晓庆, 王英俭. 利用中尺度天气预报模式预报大气光学湍流[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(4): 270-275.
- 14 Xu Liming, Wu Xiaoqing, Wang Yingjian. Methods comparison of estimating optical turbulence profile using conventional meteorology parameters[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 53-57.
许利明, 吴晓庆, 王英俭. 用常规气象参数估算光学湍流廓线方法的比较[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 53-57.
- 15 Wang Hongshuai, Yao Yongqiang, QianXuan, *et al.*. The method of modeling atmospheric optical turbulence[J]. Acta Astronomica Sinica, 2012, 53(6): 527-537.
王红帅, 姚永强, 钱 璇, 等. 大气光学湍流模型计算方法[J]. 天文学报, 2012, 53(6): 527-537.
- 16 Wang Hongshuai, Yao Yongqiang, Liu Liyong. Forecast of atmosphere optical turbulence at ali site by weather research and forecasting model[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0301006.
王红帅, 姚永强, 刘立勇. 基于天气预报模式预报阿里天文站大气光学湍流[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301006.
- 17 Song Zhengfang. Applied Atmospheric Optics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 67-70.
宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 67-70.
- 18 Lü Meizhong, Hou Zhiming, Zhou Yi. Dynamic Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 77-78.
吕美仲, 侯志明, 周 毅. 动力气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 77-78.
- 19 Tatarski V I. Wave Propagation in a Turbulent Medium[M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- 20 Qing Chun, Wu Xiaoqing, Li Xuebin, *et al.*. Forecast upper air optical turbulence based on weather research and forecasting model [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(6): 061009.
青 春, 吴晓庆, 李学彬, 等. 基于天气数值预报模式预报高空光学湍流[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 061009.
- 21 Ruggiero F H, Debenedictis D A. Forecasting optical turbulence from mesoscale numerical weather prediction models[C]. Preprints, DoDHPCMP Users Group Conference, 2000.
- 22 Qin Yuzhen, Wu Xiaoqing, Li Duoyang, *et al.*. Design and capability analysis of meteorologic radiosonde for turbulence[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 166-170.
秦余贞, 吴晓庆, 李多扬, 等. 湍流气象探空仪的研制及其性能分析[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 166-170.
- 23 Wu Xiaoqing, Qian Xianmei, Huang Honghua, *et al.*. Measurements of seeing, isoplanatic angle, and coherence time by using balloon-borne microthermal probes at Gaomeigu[J]. Acta Astronomica Sinica, 2014, 55(2): 144-153.
吴晓庆, 钱仙妹, 黄宏华, 等. 丽江高美古视宁度、等晕角及相干时间的探空测量[J]. 天文学报, 2014, 55(2): 144-153.

栏目编辑: 史 敏