

随机并行梯度下降算法拟合大气湍流廓线统计模式的研究

罗 曦^{1,2} 李新阳^{1,2*}

(¹ 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209)

(² 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要 掌握湍流基本规律及其廓线结构分布,是大气光学理论与应用研究中的关键问题之一。利用随机并行梯度下降算法对大气湍流廓线统计模式拟合进行了研究。在已获合肥地区整层大气折射率结构常数 C_N^2 平均廓线的前提下,以广义 Hufnagel-Valley 湍流模型为基础,拟合获得了该地区不同时间与不同季节的湍流模式廓线。研究发现,该方法获得的该地区湍流模式廓线在整层大气高度上均能很好地同实测平均廓线相符合,且两者所表征的整层湍流特征参量也能保持非常好的一致性。对寻求基于 Hufnagel-Valley 模型的通用湍流廓线模式拟合方法进行有益的探索。

关键词 大气光学;大气折射率结构常数;湍流廓线模式;随机并行梯度下降算法;相干长度

中图分类号 O437; P427.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0901003

Investigation on Atmospheric Optical Turbulence Profile Statistical Mode by Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Luo Xi^{1,2} Li Xinyang^{1,2}

(¹ *Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*)
(² *Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*)

Abstract Understanding vertical profiles of atmospheric turbulence characteristics is one of the most important problems for theoretical and applied research in the fields of atmospheric optics. Stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is proposed for turbulence profile mode fitting. Based on the generalized Hufnagel-Valley model, atmospheric turbulence profile models for different seasons and time of day in Hefei have been developed to fit each observed average C_N^2 vertical profile by SPGD algorithm. The results show that, not only the obtained turbulence mode show best accordance with the observed average profiles of C_N^2 over the whole atmosphere, but also the optical turbulence characteristic parameters of the obtained turbulence modes are in good agreement with those for the average profiles of C_N^2 . The investigation is a useful exploration for developing a “universal method” for turbulence profile model fitting based on the generalized Hufnagel-Valley model.

Key words atmospheric optics; refractive-index structural constant; optical turbulence profile mode; stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm; coherence length

OCIS codes 010.1290; 010.1330; 010.1080

1 引 言

大气是诸多实际光学应用中光波传输的基本通道。由于人类活动和太阳辐射等因素所引发的大气

湍流运动造成大气折射率的随机起伏,进而导致传输光束产生随机漂移、扩展、畸变和闪烁等湍流效应,严重地限制了其实际应用性能。由此可见,湍流

收稿日期: 2012-03-02; 收到修改稿日期: 2012-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61138007)资助课题。

作者简介: 罗 曦(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事大气光波传输方面的研究。E-mail: luoxihust@126.com

* 通信联系人。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

大气对于光波的传输具有根本性破坏作用^[1~3],若能充分研究并掌握湍流的基本规律及其结构特性,就可以为光学工程的实际应用与理论计算提供一定的数据参考。

大气折射率结构常数 C_N^2 是表征大气光学湍流强度的一个重要参量^[4,5]。对于大气光波传输而言,湍流强度及其廓线分布是影响其传输特性的重要因素^[6,7]。然而,在工程实践中,要想实时获取大气折射率结构常数 C_N^2 是十分困难的。通常利用实验观测获得的 C_N^2 高度分布统计平均廓线数据来拟合其模式廓线,进而对其光波传输影响进行分析与预估。迄今,国内外很多学者针对不同地区的大气折射率结构常数 C_N^2 进行了观测与研究^[8~16],并以此为基础提出了多种湍流廓线模型^[9~11,17~19],比较典型的包括 Satellite Laser Communications (SLC) 模型^[17]、AFGLAMOS 模型^[18]以及 Hufnagel-Valley (HV) 模型^[18,19]。其中,考虑边界层湍流效应的广义 Hufnagel-Valley 中纬度模型可通过 7 个待调整参数项的相互配合^[19],构造出符合实际气象条件下 C_N^2 随高度分布统计平均规律的湍流廓线模式,已成为目前光波传输湍流效应研究中应用较为广泛的一类湍流廓线模型。该类模型虽能反映湍流高度分布的一般特征,但对于具体地理和天气条件下实测 $C_N^2(h)$ 平均廓线的模式拟合,却全凭相关研究人员对模型中各参数的经验调配^[15,16]。因此,从实际应用的角度出发,寻求一种基于 Hufnagel-Valley 模型的通用湍流廓线模式拟合方法就显得十分必要。然而,据笔者所知,这方面的相关研究成果在国内外文献中还未见报道。

本文利用随机并行梯度下降算法 (SPGD) 对大气湍流廓线统计模式拟合进行了探索性研究。在已获合肥地区整层 (0~35 km) 大气折射率结构常数 $C_N^2(h)$ 垂直分布平均廓线的前提下,以广义 Hufnagel-Valley 湍流模型为基础,利用随机并行梯度下降 (SPGD) 算法对合肥地区昼夜及四季的湍流模式廓线进行了拟合研究。结果表明,利用该方法获得的该地区湍流模式廓线由近地面至高空均能很好地同实测平均廓线相符合,且两者所表征的整层大气相干长度 r_0 与等晕角 θ_0 也保持了非常好的一致性。

2 随机并行梯度下降算法拟合大气湍流廓线统计模式

2.1 广义 Hufnagel-Valley 湍流模型

目前,在大气光波传输湍流效应研究中应用较

为广泛的是包含边界层 (Boundary layer) 效应的广义 Hufnagel-Valley 湍流模型。该模型包含 7 个可调整的参数,通过所述参数的相互调配能够拟合出符合具体地理和天气条件下实测 C_N^2 高度分布平均廓线的湍流廓线模式。

参阅文献 [19], 广义 Hufnagel-Valley 湍流模型可表示为

$$C_N^2(h) = Ah^c \exp\left(-\frac{h}{H_A}\right) + B \exp\left(-\frac{h}{H_B}\right) + D \exp\left(-\frac{h}{H_D}\right), \quad (1)$$

式中 $A, H_A, B, H_B, C, D, H_D$ 均为待拟合参数。 A, H_A, C 联合表征了对流层顶的湍流情况; B, H_B 联合表征了边界层中的湍流情况, B 为边界层中的湍流强度系数, H_B 则反映了边界层湍流强度 $1/e$ 衰落所对应的垂直高度, H_B 越小则边界层越薄; D, H_D 则联合定义了对流层中 (上至 10 km) 的湍流情况。

2.2 随机并行梯度下降 (SPGD) 算法在湍流廓线模式拟合研究中的可行性

SPGD 算法是由美国陆军研究实验室 Vorontsov 等^[20]提出的一种利用系统性能指标测量值进行控制参数优化的自适应光学控制新方法。特别地,由于该算法以并行方式实现对多参数的控制优化,使其在高维优化问题中具有独特的优势^[21,22]。

该算法的基本思想是,利用系统性能指标测量值的变化量 (ΔJ) 与控制参数的变化量 (ΔU) 进行控制参数的梯度估计,并以迭代方式在梯度下降方向上进行控制参数 (U) 的搜索,从而使系统性能指标 (J) 向预期方向优化。上述基本思想启发利用 SPGD 算法解决基于 Hufnagel-Valley 模型的大气湍流廓线统计模式研究中多维参数的优化问题。

这里,主要利用双向扰动 SPGD 算法进行湍流廓线模式拟合,其基本实现如下:

设存在待拟合参数向量 (即由 Hufnagel-Valley 模型中 7 个待定参数构成的向量 \bar{U}) 的双向扰动时,系统性能指标变化量为

$$\Delta J^{(k)} = \Delta J_+^{(k)} - \Delta J_-^{(k)}, \quad (2)$$

式中 $\Delta J_+^{(k)}, \Delta J_-^{(k)}$ 分别表示由待拟合参数向量的正向、负向扰动所引发的系统性能指标变化量:

$$\begin{cases} \Delta J_-^{(k)} = J[\bar{U}^{(k)} - \Delta \bar{U}^{(k)}] - J[\bar{U}^{(k)}] \\ \Delta J_+^{(k)} = J[\bar{U}^{(k)} + \Delta \bar{U}^{(k)}] - J[\bar{U}^{(k)}] \end{cases}. \quad (3)$$

因此,当存在增益系数 γ 的前提下,便可以获得 Hufnagel-Valley 湍流模型中待拟合参数向量 \bar{U} 的

迭代计算公式：

$$\bar{U}^{(k+1)} = \bar{U}^{(k)} \pm \gamma \times \overline{\Delta U}^{(k)} \times \Delta J^{(k)}, \quad (4)$$

式中 k 为待拟合参数向量 \bar{U} 的迭代次数； $\overline{\Delta U}^{(k)} = [\Delta A, \Delta H_A, \Delta C, \Delta B, \Delta H_B, \Delta D, \Delta H_D]^{(k)}$ 为第 k 次迭代时所施加的随机扰动向量，其各分量可分别为满足伯努利分布^[23]、且是具有不同扰动幅值的相互独立随机变量；式中增益系数 γ 前“ \pm ”号的选取，应视实际应用中系统性能指标(J)的具体形式而定。

2.3 系统评价函数的选取

在 SPGD 算法中，系统性能指标(也即评价函数)、增益系数以及随机扰动幅度的选取等因素决定了算法的收敛精度与速度^[24]。对该算法在大气湍流廓线模式研究中的应用而言，本文更加关注的是合理收敛速度条件下的收敛精度问题，即利用该算法拟合得到的湍流模式廓线是否能够最大程度地符合实测 C_N^2 统计平均廓线、并真实地反映具体地理和气象条件下的湍流基本特征。上述问题的合理解决，在很大程度上取决于系统评价函数的选取。

如若希望拟合湍流模式廓线能够真实反映具体地理和气象条件下的湍流基本特征(包括大气相干长度 r_0 与等晕角 θ_0)，首先应从湍流基本参数的相关定义出发来寻求答案。回顾 Fried^[25] 和 Hardy^[19] 的相关理论研究结果，可以发现：

$$\begin{cases} r_0 = \left[0.423 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sec \xi \int_L C_N^2(h) dh \right]^{-3/5} \\ \theta_0 = \left[2.914 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\sec \xi)^{8/3} \int_L C_N^2(h) h^{5/3} dh \right]^{-3/5} \end{cases}, \quad (5)$$

即整层大气的相干长度(r_0)与等晕角(θ_0)分别同湍流 0 阶与 5/3 阶高度完全矩(Full-moments)密切相关^[19]。大气相干长度(r_0)是湍流强度 $C_N^2(h)$ 沿光束传输路径($\int \sec \xi dh$)线性累积效应的直接表征；而等晕角(θ_0)则体现了湍流强度沿光束传输路径 5/3 次方加权 $[C_N^2(h) \times (h \sec \xi)^{5/3}]$ 后的传输路径累积效应。

因此，首先出于对拟合模式廓线与实测平均廓线所表征等晕角达到更好符合的基本特征考虑出发(在两者所表征大气相干长度达到一定符合的前提下)，即拟合模式廓线与实测平均廓线自近地面至高空均能保持较好的一致性，将包含垂直高度 5/3 次方的权重函数 $h^{5/3}$ 引入系统评价指标是十分必要的。

由(1)式可以看到：在对 Hufnagel-Valley 湍流模型中各参数的并行调配过程中，应始终以实测 C_N^2

统计平均廓线为基准，尽可能地使拟合模式廓线与统计平均廓线相符合，并尽可能地使两者所表征的湍流特征参量保持一致。

综上，设拟合模式廓线函数 $C_{N-fit}^2(h)$ 及权重函数 $\omega(h) = h^{5/3} \{ \omega[h(i)]$ 表示平均廓线数据 $C_{N-fit}^2[h(i)]$ 的高度比重)。根据离散情形下最佳平方逼近的基本思想^[26]，同时考虑 $C_N^2(h)$ 统计平均分布由近地面至高空(上至 30 km)间存在若干个数量级的变化，取拟合廓线 $C_{N-fit}^2[h(i)]$ 与平均廓线 $C_{N-aver}^2[h(i)]$ 对数偏差的 $h^{5/3}$ 加权平方和的算术平均：

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h(i)^{5/3} \times \{ \lg \{ C_{N-aver}^2[h(i)] \} - \lg \{ C_{N-fit}^2[h(i)] \} \}^2, \quad (6)$$

作为 SPGD 算法拟合大气湍流廓线统计模式研究中的系统评价函数。特别地，由于数学处理上需要将高度权重函数($h^{5/3}$)独立于对应高度 h 处拟合廓线 $C_{N-fit}^2[h(i)]$ 与平均廓线 $C_{N-aver}^2[h(i)]$ 偏差的对数运算 $\{ \log_{10} [C_{N-aver}^2(h)/C_{N-fit}^2(h)] \}$ ，因此上述系统评价函数(6)式与(5)式中第二子式的高度加权形式并不严格一致。

(6)式中 $C_{N-aver}^2[h(i)]$ 为实测随高度分布湍流强度的平均廓线数据； $C_{N-fit}^2[h(i)]$ 为相应高度处的拟合模式廓线数据； $h(i)$ 为对应测量位置处的高度； i 为实测沿高度分布 $C_{N-aver}^2[h(i)]$ 平均廓线对应的样本序号； N 为实测沿高度分布 $C_{N-aver}^2[h(i)]$ 平均廓线对应的样本总数。

此外，拟合过程中应根据具体的实测 C_N^2 统计平均廓线数据对增益系数、HV 湍流模型中各参数初值及其随机扰动幅度进行合理选择，以使算法收敛于该评价函数的极小值。

3 湍流廓线模式拟合结果与讨论

在上述理论研究的基础上，根据已获得的合肥地区整层(0~35 km)大气折射率结构常数 $C_N^2(h)$ 垂直分布的统计平均廓线，并以广义 Hufnagel-Valley 湍流模型为基础，利用 SPGD 算法对该地区不同时间(白天、夜晚)和不同季节(春、夏、秋、冬)的湍流模式廓线进行了拟合研究。

3.1 合肥地区昼夜湍流廓线统计模式的拟合结果与讨论

根据合肥地区不同观测时间段的 C_N^2 统计平均廓线，利用 SPGD 算法拟合得到该地区白天、夜晚的湍流廓线模式廓线，分别如(7)、(8)式所示，其中

大气折射率结构常数 $C_N^2(h)$ 的单位是 $\text{m}^{-2/3}$; 高度 h 的单位是 km。

白天:

$$C_N^2(h) = 2.355 \times 10^{-20} \times h^{5.174} \exp\left(-\frac{h}{2.215}\right) + 0.147 \times 10^{-14} \exp\left(-\frac{h}{0.148}\right) + 0.615 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{3.717}\right), \quad (7)$$

夜晚:

$$C_N^2(h) = 4.007 \times 10^{-21} \times h^{4.991} \exp\left(-\frac{h}{2.048}\right) + 0.115 \times 10^{-14} \exp\left(-\frac{h}{0.091}\right) + 0.213 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{3.859}\right). \quad (8)$$

上述湍流拟合模式廓线[见(7)式、(8)式]与其对应时段实测平均廓线的对比,分别如图 1(a)、(b)所示。

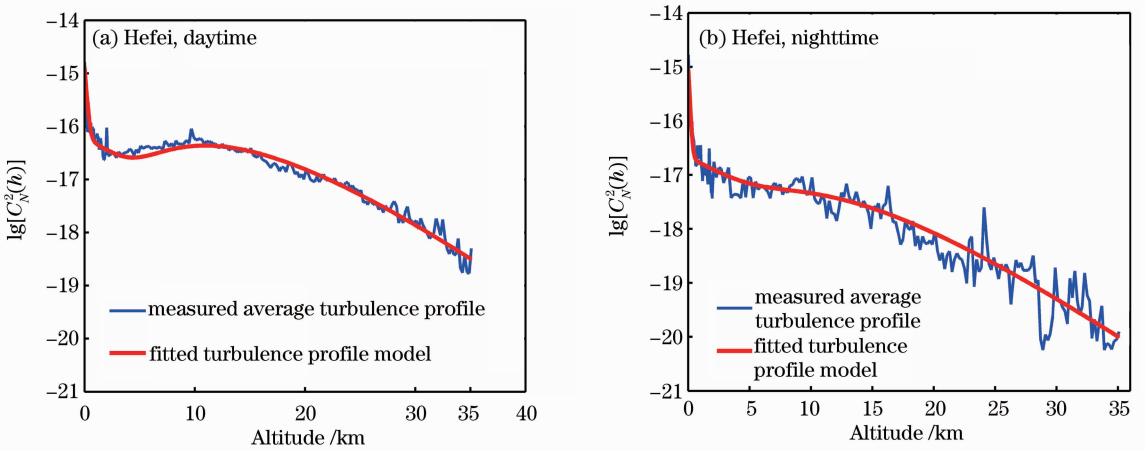


图 1 合肥地区不同时段湍流拟合模式廓线与实测平均廓线的比较。(a)白天;(b)夜晚

Fig. 1 Comparisons of the fitted profiles and the measured statistical average profiles of C_N^2 for different time of day in Hefei. (a) Daytime; (b) nighttime

对比图 1(a)、(b)可以看出:不同观测时间段,该地区的大气折射率结构常数 C_N^2 平均廓线随高度增加总体呈现出递减趋势,并具有明显的分层结构,但各自的强度分布及其高度变化特点却并不相同。总体来说,白天 C_N^2 随高度递减的趋势较为缓和,而夜间 C_N^2 随高度的减小幅度有所增强,并伴有较大的随机起伏。

从拟合结果上看,不同时间段 C_N^2 的拟合模式廓线自近地面至高空均能很好地符合对应实测 C_N^2 的统计平均廓线。白天的湍流模式廓线在 $10^{-19} \sim 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,而夜晚的湍流模式廓线在 $10^{-20} \sim 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,且其强度随高度的减小幅度较白天有所增强,由近地面至整层大气高度(上至 35 km)间约

存在 5 个数量级的变化。

3.2 合肥地区四季湍流廓线统计模式的拟合结果与讨论

大气折射率结构常数 C_N^2 随高度的变化不仅存在昼夜差异,而且具有季节特点。因此,对不同季节 C_N^2 随高度变化规律的研究也是大气光学理论与应用研究中十分必要的环节。这里,针对该地区四季的湍流垂直分布 C_N^2 模式廓线进行了拟合研究。

根据该地区四季的实测 C_N^2 统计平均廓线,利用 SPGD 算法拟合得到该地区春季、夏季、秋季以及冬季的湍流廓线模式,分别如(9)~(12)式所示。其中,大气折射率结构常数 $C_N^2(h)$ 的单位是 $\text{m}^{-2/3}$; 高度 h 的单位是 km。

春季:

$$C_N^2(h) = 3.265 \times 10^{-20} \times h^{4.89} \exp\left(-\frac{h}{2.281}\right) + 0.88 \times 10^{-14} \exp\left(-\frac{h}{0.081}\right) + 0.644 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{3.81}\right), \quad (9)$$

夏季:

$$C_N^2(h) = 31.148 \times 10^{-23} \times h^{8.208} \exp\left(-\frac{h}{1.489}\right) + 0.415 \times 10^{-14} \exp\left(-\frac{h}{0.049}\right) + 0.788 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{2.946}\right), \quad (10)$$

秋季:

$$C_N^2(h) = 11.565 \times 10^{-20} \times h^{3.807} \exp\left(-\frac{h}{2.587}\right) + 0.355 \times 10^{-14} \exp\left(-\frac{h}{0.066}\right) + 0.256 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{3.209}\right), \quad (11)$$

冬季:

$$C_N^2(h) = 28.055 \times 10^{-20} \times h^{3.888} \exp\left(-\frac{h}{2.315}\right) + 0.411 \times 10^{-14} \exp\left(-\frac{h}{0.111}\right) + 0.576 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{3.076}\right). \quad (12)$$

上述湍流拟合模式廓线[见(9)~(12)式]与其对应季节实测平均廓线的对比,分别如图 2(a)~(d)所示。

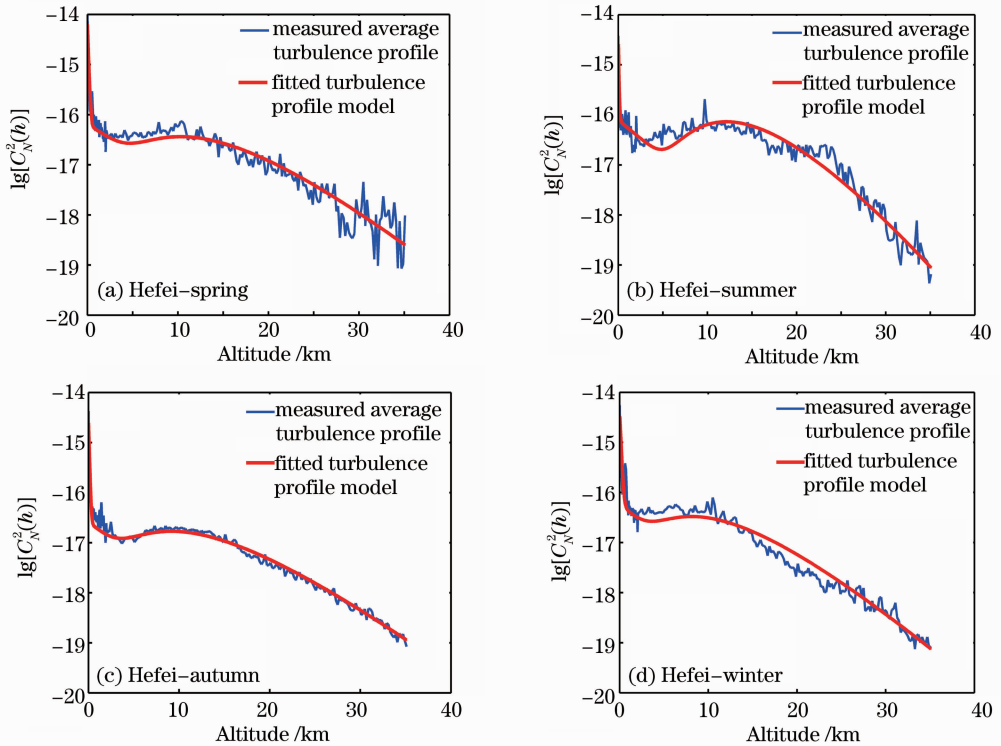


图 2 合肥地区不同季节大气折射率结构常数拟合模式廓线与实测平均廓线的比较。(a)春季; (b)夏季; (c)秋季; (d)冬季

Fig. 2 Comparisons of the fitted profiles and the measured statistical average profiles of atmospheric refractive-index structural constant C_N^2 for different seasons in Hefei. (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

综合图 2 可以看到:该地区四季 C_N^2 平均廓线的整体变化趋势大致相同,即随高度增加而整体呈现出逐渐减弱趋势,并在对流层顶(一般十几千米高度)附近略有增强,但各季节 C_N^2 随高度的变化特点却不相同。其中,春、秋、冬三季的 C_N^2 在 15 km 以下基本维持在 $10^{-17} \sim 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 之间,而夏季的 C_N^2 在 25 km 以下基本维持在 $10^{-17} \sim 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 之间,自 25 km 开始其值随高度的增加而迅速减小,

至 30 km 以上已减小到 $10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$ 。

从拟合结果上看:不同季节 C_N^2 的拟合模式廓线自近地面至高空均能很好地符合对应实测 C_N^2 的统计平均廓线。总体来说,各季节 C_N^2 垂直分布模式廓线虽各具特点,但不同季节的湍流模式廓线均呈现出随高度而递减的变化趋势,并在对流层顶部略有增强,这正是大气湍流随高度分布重要特征的真实反映。

4 湍流廓线模式拟合中对算法评价函数、增益系数及随机扰动幅度选取的初步考虑

拟合湍流模式廓线能否真实反映具体气象条件下的实际湍流基本特征,是 SPGD 算法拟合湍流廓线统计模式研究中的关键问题之一。

对比文献[16]发现:拟合得到的合肥地区湍流廓线模式与文献[16]中所报道的结果有明显差异{见文献[16](8)~(14)式}。并且,相比本文的拟合结果(见图 1、2),文献[16]的模式廓线与其对应实测平均廓线在近地面或高空并非有较好的符合{例如,文献[16]中图 5(b)所示夏季廓线的高空部分、图 5(c)所示秋季廓线的近地面部分}。

表 1 合肥地区大气折射率结构常数实测平均廓线与拟合模式廓线对应整层(0~35 km)大气湍流基本特征参数的比较

Table 1 Comparisons of optical turbulence characteristic parameters corresponding to statistical average measured profiles and fitting modes of C_N^2 in Hefei

Hefei	Turbulence parameters	Daytime	Nighttime	Spring	Summer	Autumn	Winter
Measured average turbulence profile	Coherence length r_0 /cm	11.2118	28.2357	9.5456	9.9326	17.2917	11.4940
	Isoplanatic angle θ_0 /μrad	3.3447	15.4094	3.7163	2.7242	6.3907	5.0223
Fitted turbulence profile model (Our results)	Coherence length r_0 /cm	11.1471	28.1891	9.5527	9.9061	17.2136	11.4309
	Isoplanatic angle θ_0 /μrad	3.3387	15.4396	3.7897	2.7129	6.4371	5.0391
Fitted turbulence profile model (Ref. [16])	Coherence length r_0 /cm	10.3221	22.9565	10.3221	Maybe there's some typeset error in Eq. (12)	17.1083	10.8082
	Isoplanatic angle θ_0 /μrad	3.4616	17.0236	3.4616		6.2588	5.4235

从表 1 可以看出,本文拟合得到的模式廓线与其对应平均廓线所表征的大气相干长度 r_0 与等晕角 θ_0 均保持了非常好的一致性。

本文是将 SPGD 算法应用于获取 Hufnagel-Valley 湍流模型中多维参数最佳值的初步探索,因此尚难以对具体地理和天气条件下的湍流廓线模式拟合中增益系数、参数初值及其随机扰动幅度等参数选择作出普遍性的规律总结。在对合肥地区湍流模式廓线的拟合过程中发现:1)边界层湍流强度系数 B 的迭代初值一般为 $(1\sim 10)\times 10^{-15}$,其湍流强度 $1/e$ 衰落所对应的垂直高度 H_B 迭代初值一般取 0.1 附近;2)对流层湍流强度系数 D 的迭代初值一般为 $(1\sim 10)\times 10^{-17}$,其湍流强度 $1/e$ 衰落所对应的垂直高度 H_D 迭代初值一般大于 1.5;3)对流层顶 H_A 的迭代初值一般取为 1, A 、 C 的迭代初值视实测平均廓线样本而有差异;4)海拔高度 h 单位为 km 条件下,迭代过程中的随机扰动幅度一般取 0.001~0.003、算法增益系数一般取 0.001~0.005,过大容易陷入局部极值;5)迭代过程一般采

取参数初值、增益系数分阶段调整,逐步逼近评价函数极小值的方式进行。

取参数初值、增益系数分阶段调整,逐步逼近评价函数极小值的方式进行。

5 结 论

本文利用 SPGD 算法对大气湍流廓线统计模式拟合进行了研究。通过将包含垂直高度 $5/3$ 次方的权重函数引入系统评价指标,在已获合肥地区大气折射率结构常数 C_N^2 平均廓线的前提下,以广义 Hufnagel-Valley 湍流模型为基础,对该地区昼夜及四季的湍流模式廓线进行了拟合研究。结果表明,该方法拟合得到的该地区湍流模式廓线由近地面至高空均能很好地同实测平均廓线相符合,且两者所表征的整层大气相干长度 r_0 与等晕角 θ_0 也能保持非常好的一致性。该研究对寻求基于 Hufnagel-Valley 模型的通用湍流廓线模式拟合方法进行了有益的探索,也为进一步开展典型地区的大气湍流廓线模式研究提供了极有意义的参考。

致谢 本文所用到的合肥地区大气湍流 C_N^2 廓线测

量数据由中科院安徽光机所提供,在此表示感谢。

参 考 文 献

- Rao Ruizhong. Light Propagation in the Turbulent Atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005. 1~21
- 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. 1~21
- Wu Yunyun, Li Xinyang. Research and simulation about effect of adaptive optics on atmospheric optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31** (S1): S100212
武云云, 李新阳. 自适应光学对大气激光通信质量的影响研究与仿真 [J]. *光学学报*, 2011, **31** (S1): S100212
- Shen Baoliang, Sun Jianfeng, Zhou Yu *et al.*. Influence of time-varying atmospheric turbulence of facular orientation deviation in dynamic process [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38** (8): 0805004
沈宝良, 孙健锋, 周煜等. 时变湍流对动态移动光斑定位精度的影响 [J]. *中国激光*, 2011, **38** (8): 0805004
- Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming *et al.*. Profile and character of atmospheric temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24** (5): 592~596
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明等. 大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响 [J]. *光学学报*, 2004, **24** (5): 592~596
- Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming. Statistical characteristics of vertical distribution of atmospheric structure constant of refractive index C_n^2 [J]. *J. Atmospheric & Environmental Optics*, 2011, **6** (2): 83~88
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明. 大气折射率结构常数 C_n^2 高度分布统计特性分析 [J]. *大气与环境光学学报*, 2011, **6** (2): 83~88
- Zhang Shouchuan, Wu Yi, Hou Zaihong *et al.*. Lidar measurement of atmospheric turbulence vertical profiles [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21** (12): 1795~1798
张守川, 吴毅, 侯再红等. 激光雷达测量大气湍流廓线 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21** (12): 1795~1798
- Qiao Na, Dan Youquan, Zhang Bin. Propagation properties of elegant Hermite-Gaussian beams in atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30** (6): 1542~1547
乔娜, 但有全, 张彬. 复宗量厄米高斯光束在大气湍流中的传输特性 [J]. *光学学报*, 2010, **30** (6): 1542~1547
- D. L. Fried. Limiting resolution looking down through the atmosphere [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56** (10): 1380~1384
- J. L. Bufton, P. O. Minott, M. W. Fitzmaurice *et al.*. Measurements of turbulence profiles in the troposphere [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62** (9): 1068~1070
- R. E. Hufnagel. Variations of atmospheric turbulence — digest of technical papers [C]. Topical Meeting on Optical Propagation Through Turbulence, University of Colorado, 1974. 9~11
- R. Barletti, G. Ceppatelli, L. Paterno *et al.*. Mean vertical profile of atmospheric turbulence relevant for astronomical seeing [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66** (12): 1380~1383
- G. R. Ochs, T. Wang, R. S. Lawrence *et al.*. Refractive-turbulence profiles measured by one-dimensional spatial filtering of scintillations [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15** (10): 2504~2510
- G. C. Loos, C. B. Hogge. Turbulence of the upper atmosphere and isoplanatism [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18** (15): 2654~2661
- Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming *et al.*. Profile and character of atmospheric structure constants of refractive index [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17** (4): 485~490
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明等. 不同地区大气折射率结构常数分布特性及分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17** (4): 485~490
- Wu Xiaoqing, Sun Gang, Weng Ningquan *et al.*. Measurement and modeling of C_n^2 at typical regions in China [J]. *J. Atmospheric & Environmental Optics*, 2007, **2** (6): 409~422
吴晓庆, 孙刚, 翁宁泉等. 典型地区大气光学湍流测量与模式研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2** (6): 409~422
- Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming. Vertical distribution models of atmospheric structure constant of refractive index [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20** (2): 183~188
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明. 合肥地区大气折射率结构常数高度分布模式 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20** (2): 183~188
- J. K. Lawson, C. J. Carrano. Using historic models of C_n^2 to predict r_0 and regimes affected by atmospheric turbulence for horizontal, slant and topological paths [C]. *SPIE*, 2006, **6303**: 630304
- R. R. Beland. Propagation through atmospheric optical turbulence [C]. *Atmospheric Propagation of Radiation*, 1993, **2**: 157~232
- J. W. Hardy. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes [M]. New York: Oxford University Press, 1998. 82~86
- M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, M. Cohen *et al.*. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17** (8): 1440~1453
- Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Comparison of several stochastic parallel optimization control algorithms for adaptive optics system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20** (1): 11~16
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20** (1): 11~16
- Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27** (8): 1355~1360
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27** (8): 1355~1360
- J. C. Spall. Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, **37** (3): 332~341
- Yang Huizhen. Investigation on Stochastic Parallel Gradient Descent Control Algorithm and Its Application in Adaptive Optics System with No Wave-Front Detection [D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 19~25
杨慧珍. 无波前探测自适应光学随机并行优化控制算法及其应用研究 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2008. 19~25
- D. L. Fried. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55** (11): 1427~1435
- Li Hong. Numerical Analysis [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003. 63~82
李红. 数值分析 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003. 63~82

栏目编辑: 何卓铭