

测量大气相干长度的数据处理算法比对研究

马后永, 张守川, 靖旭, 吴毅

(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)

摘要: 利用波面算法和差分像运动法对湍流强度廓线激光雷达采集的测量数据进行了处理, 对两种不同数据处理算法得到的大气相干长度结果进行了比对分析, 结果发现波面法第三阶系数方差得到的大气相干长度精度较高。

关键词: 大气光学; 湍流强度廓线激光雷达; 大气相干长度; 算法

中图分类号: P413

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2010)06-0427-04

Comparison of Two Methods of Calculated Atmosphere Coherence Length

MA Hou-yong, ZHANG Shou-chuan, JING Xu, WU Yi

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

Abstract: The data of turbulence profile lidar are analyzed by Zernike modal wavefront reconstruction algorithm and differential image motion monitor. Then, the atmosphere coherence length calculated via these two methods is analyzed. The result shows the precision of atmosphere coherence length obtained by a_3 variance of Zernike modal wavefront reconstruction is higher than others.

Key words: atmospheric optics; turbulence profile lidar; atmosphere coherence length; algorithm

1 引言

大气湍流廓线激光雷达基于瑞利信标原理^[1], 即由雷达的发射系统发射聚焦光束, 利用焦点附近的大气瑞利后向散射, 形成一个瑞利信标, 作为雷达接收系统的散射光源。为了达到测量湍流廓线的目的, 使聚焦光束的焦点在需要测量的区域进行扫描, 接收系统相应调整接收望远镜的焦距和像增强曝光闸门的延时和闸门宽度, 以接收

特定高度特定区域的后向散射回波, 经六孔径波前分割成像后, 由 ICCD 采集光斑图像数据, 进而通过一定的算法处理光斑图像信息, 获得描述大气湍流的相干长度值。目前大气相干长度仪^[2]是利用差分像运动法测量光束的到达角起伏方差来确定大气相干长度的, 虽然这种方法对测量仪器本身的抖动、接收系统的光学质量、望远镜焦距的温度效应以及信标光源亮度的起伏等因素都

收稿日期: 2010-04-12; 修改日期: 2010-05-17

基金项目: 中国科学院科技创新基金项目 (CXJJ-245) 资助

E-mail: mhy6156869@yahoo.com.cn

是不敏感的, 可望获得良好的测量精度, 但是对于湍流廓线激光雷达而言, 其具有多点多方向上的差分像运动信息, 另外从波面分割的测量原理来看, 还可以处理出湍流畸变波前除波前倾斜外的低阶信息。而波前畸变的信息与大气湍流相干长度有直接的联系, 采用波面算法获得的大气相干长度测量值可以有效避免方向不均匀性。本文利用实验数据对这种方法进行分析, 并与差分像运动处理算法获得的测量值进行了分析对比。

2 计算原理

2.1 波面算法

湍流廓线雷达采用的是六孔径的哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)传感器, 通过测量波前斜率

获得波前相位信息, 与实际自适应光学系统中的拟合算法相同, 采用的是 Zernike 多项式进行拟合, 该方法是将信标光波前展开成 Zernike 多项式, 以探测出各子孔径上的波前斜率求得展开式(1)的各项系数^[3-4]

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=3}^M a_i z_i(x, y). \quad (1)$$

参考文献[4]中描述的方法, 求得 Zernike 的各阶展开系数 $[a_i]$ 。在 Hartmann-Shack 传感器对大气湍流波前畸变的 Zernike 模式复原中, Noll 的研究表明^[5], 符合 Kolmogoroff 谱的大气扰动带来的 Zernike 各阶系数方差与 r_0 的关系见表1^[6]。通过表1可以求得待测空间的 r_0 。

表1 符合 Kolmogoroff 谱的大气扰动带来的各阶 Zernike 系数方差

Table 1 Variance of different Zernike orders of Kolmogoroff atmospheric turbulence

Zernike order	Variance(rad ²)	Zernike order	Variance(rad ²)
1	$0.4479(D/r_0)^{5/3}$	5	$0.0232(D/r_0)^{5/3}$
2	$0.448(D/r_0)^{5/3}$	6	$0.0061(D/r_0)^{5/3}$
3	$0.023(D/r_0)^{5/3}$	7	$0.0062(D/r_0)^{5/3}$
4	$0.023(D/r_0)^{5/3}$	8	$0.0062(D/r_0)^{5/3}$

2.2 差分像运动测量法

差分像运动测量法是将信标光通过两个子孔径后到达成像系统, 利用光楔或其它方法使目标光在 CCD 上形成两个分离的像, 两个像间连线方向的像运动方差(抖动量) σ^2 与 r_0 的关系为^[7]

$$r_0 = \left\{ \frac{2f^2[0.36(\lambda/D)^{1/3} - 0.242(\lambda/d)^{1/3}]\lambda^{5/3}}{\sigma^2} \right\}^{3/5}, \quad (2)$$

其中, $\sigma^2 = (\bar{b}_i^2 - \bar{b}_i^2)$, $\bar{b}_i^2 = (\sum b_i^2)/N$, $\bar{b}_i^2 = (\sum b_i/N)^2$, 式中 b_i 为第 i 幅图两个像间的距离, f 为望远镜和光学成像系统的组合焦距, d 为两光学接收镜的中心间距, D 为两光学接收镜的直径, N 为图像的个数。

3 仪器结构

湍流强度廓线激光雷达由发射系统、接收系

统、控制系统以及数据采集系统构成, 如图1(a)所示。望远镜的口径为400 mm, 发射光束透镜的孔径为200 mm, 六个接收子镜均匀分布在发射透镜的周围, 其直径为100 mm, 六个子镜有一定的楔角使光束在焦平面上成如图1(b)所示的像, 整个接收系统的焦距为170 cm。控制系统使整个系统协调工作, 通过控制步进电机对接收和发射系统的焦距进行调节。数据采集系统实现图像数据的采集与存储, 发射光束波长为532 nm。

利用该仪器调节控制系统使发射光束水平聚焦在1 km, 调整接收系统接收来自1 km处的后向散射光, 光束的下垫面比较复杂, 有草地和湖水, 为获得大量数据进行了多天的观测。

4 实验结果

首先用差分像运动法对实验数据进行了处

理, 根据六个光斑的正六边形分布特征分别进行了九组数据处理 (图 1(b) 中如 1、4 两点最远距离的三组和 1、3 两点次远距离的六组), 为了和波面法计算的结果进行比较, 我们对差分像运动法得到的各个方向的九组大气相干长度取平均, 这主要是由于实际大气只能满足局地各向均匀同性, 而大气相干长度是一个统计量取平均值后相对某一个测量值而言应该是最能接近系综值的最佳估计 [8], 因此用平均值和波面法得到的结果进行比对分析, 下面提到差分像运动法所得结果都表示九组大气相干长度的平均。图 2(a) 给出了分别用波面算法和差分像运动算法处理的 2009 年 3 月 9 日的数据处理结果。

图 2 中, $a_3 \sim a_7$ 表示 Zernike 多项式第三阶到第七阶系数方差得到的大气相干长度, DIMM 表示差分像运动法得到的相干长度。由图 2(a) 知波面法和差分像运动法所得结果在时间变化趋势

上是一致的, 存在所谓的“转换时刻”, 但是数值上各组大气相干长度之间却有差别, 我们对两种算法得到的多天实验结果做了如表 2 所示的分析。

表 2 波面法和差分像运动法结果分析

Table 2 Analysis of results calculated by two algorithms

	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
R	0.966	0.966	0.964	0.943	0.922
A	8.2%	37.0%	32.1%	14.6%	56.0%

表 2 中 R 为相关系数, A 为平均相对误差。从表 2 中两种算法处理结果的分析中知, 在波面算法处理湍流廓线激光雷达的数据时, 从相关系数分析, 波面法各阶处理的结果和差分像运动的结果其相关系数都在 0.9 以上, 说明两种算法在处理湍流廓线激光雷达数据时有很高的一致性, 但从平均相对误差分析, 波面法只有第三阶系数

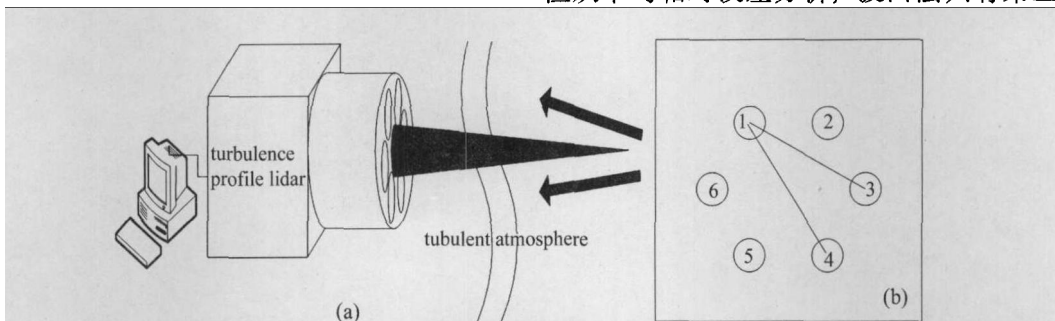


图 1 湍流强度廓线激光雷达及接收光斑位置

Fig.1 Turbulence profile lidar and positions of collected return laser light

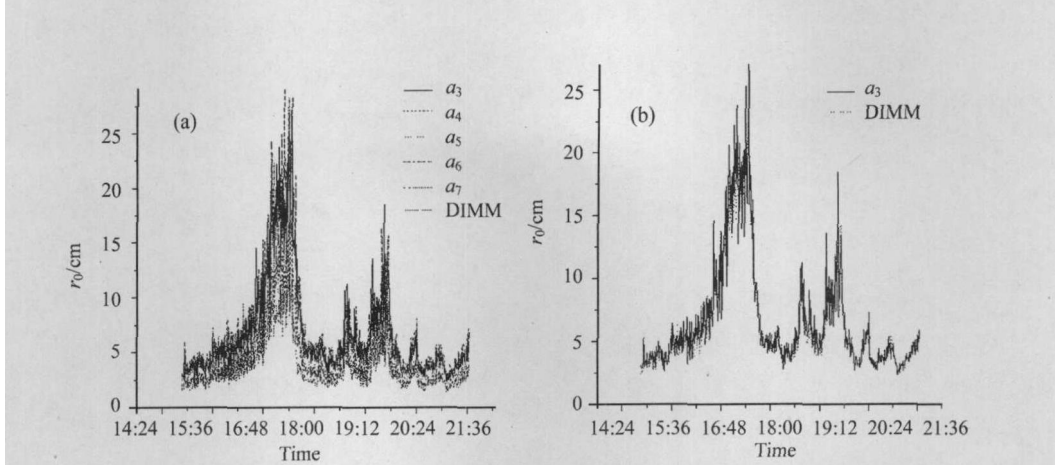


图 2 (a) 两种算法处理的实验结果 (b) 第三阶系数方差和差分像运动法所得结果

Fig.2 Experiment results calculated by two algorithms (a) and results obtained by a_3 variance and DIMM (b)

方差所得结果和差分像运动所得结果的平均相对误差较小, 我们知道第四阶和第五阶 Zernike 多项式对应的像差为像散项, 它们计算的结果理论上应该是一致的, 虽然平均相对误差较为接近, 但它们的平均相对误差值较大, 导致在计算大气相干长度时这两阶不适合采用, 第六阶和第七阶 Zernike 多项式对应的像差为慧差项, 计算的结果理论上也应该是一致的, 但其平均相对误差值差别较大, 说明湍流廓线激光雷达系统并不能准确地探测出慧差项, 同样在计算大气相干长度时这两阶也不适合采用。从对第三阶系数方差所得结果的分析知其和差分像运动法所得结果不论是相关系数还是平均相对误差方面都符合的较好, 因此在用波面法处理湍流廓线激光雷达数据时, 我们选用第三阶系数方差所得实验结果, 图 2(b) 给出了只有第三阶系数方差所得实验结果和差分像运动法所得实验结果。

5 结 论

在湍流强度廓线激光雷达测量大气相干长度的过程中, 由于其具有的多点多方向差分像运动信息的特点, 为了避免方向不均匀性需要用波面法来处理测量数据, 而波面法得到的五组大气相干长度在数值上并不一致。通过与差分像运动法计算结果的分析比较, 发现第三阶系数方差得到的大气相干长度精度较高。因此在处理湍流强度廓线激光雷达数据时我们采用第三阶系数方差所得的结果。而其他各阶系数方差所得结果精度不高, 其中的原因仍然需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] Zhang Wei, Luo Zhongxiang, Xiang Rujian. Wavefront measurement of artificial beacon [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3): 375-377(in Chinese).
张 卫, 雒仲祥, 向汝建. 人造信标波前测量 [J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(3): 375-377.

- [2] Wang Jianye, Liu Xiaochun, Rao Ruizhong, et al. Measurement of atmospheric coherence length in daytime and at night [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1): 2-5(in Chinese).
汪建业, 刘晓春, 饶瑞中, 等. 大气相干长度的昼夜观测 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(1): 2-5.
- [3] Zhang Qiang, Jiang Wenhan, Xu Bing. Reconstruction of turbulent optical wavefront realized by Zernike polynomial [J]. *Opto-Electronic Engineering* [J]. 1998, **25**(6): 15-19(in Chinese).
张 强, 姜文汉, 许 冰. 利用 Zernike 多项式对湍流波前进行波前重构 [J]. *光电工程*, 1998, **25**(6): 15-19.
- [4] Wang Yingjian, Wu Yi, Gong Zhiben. A numerical model for adaptive optics system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, **6**(1): 59-61(in Chinese).
王英俭, 吴 毅, 龚知本. 自适应光学系统的数值模型 [J]. *强激光与粒子束*, 1994, **6**(1): 59-64.
- [5] Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 207-211.
- [6] Xian Hao, Jiang Wenhan. The relation between wavefront aberration and the beam quality factor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, **26**(5): 415-419(in Chinese).
鲜 浩, 姜文汉. 波像差与光束质量指标的关系 [J]. *中国激光*, 1999, **26**(5): 415-419.
- [7] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor [J]. *Astron. Astrophys.*, 1990, **227**(1): 294-300.
- [8] Huang Honghua, Yao Yongbang, Rao Ruizhong. Measurement of atmospheric coherent length by four-aperture differential image motion method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(3): 357-360(in Chinese).
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.

作者简介: 马后永 (1985-), 男, 安徽阜阳人, 硕士, 从事湍流强度廓线激光雷达的相关算法研究。