

# 利用激光雷达测量湍流强度廓线的研究

白水成<sup>1,2</sup>, 吴毅<sup>1</sup>, 侯再红<sup>1</sup>, 张守川<sup>1</sup>, 何枫<sup>1</sup>

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2 陕西省气象局, 陕西 西安 710015)

**摘要:** 介绍了一种新颖的利用激光雷达测量湍流廓线的原理, 通过对经过分层大气湍流的光束波面误差的测量, 获取各分层大气湍流的相干长度, 据此利用一定的算法反演湍流强度廓线。通过大量的实验, 验证了通过测量波面误差获得大气折射率结构常数这种方法的可行性。提出了在一定近似条件下利用平面波积分方程的递推算法反演大气折射率结构常数, 获得了较为满意的相似度, 并且与球面波算法进行了比较, 分析了各自的反演效果。

**关键词:** 大气相干长度; 湍流强度廓线; 瑞利信标; 聚焦光束

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)03-0194-04

## Measurement of Turbulence Profile with Lidar

BAI Shui-cheng<sup>1,2</sup>, WU Yi<sup>1</sup>, HOU Zai-hong<sup>1</sup>, ZHANG Shou-chuan<sup>1</sup>, HE Feng<sup>1</sup>

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 Shaanxi Province Meteorological Bureau, Xi'an 710015, China)

**Abstract:** The principle of lidar system for measuring vertical profile of the atmospheric refractive index turbulence is demonstrated. The turbulence profile retrieval technique is based on the measurement of coherent lengths of different layers. A new method is introduced using the iterative algorithm of the integration equation of plane wave to retrieve the turbulence profiles. The results were compared with that got from spherical wave equation, and their retrieve effects were analyzed.

**Key words:** atmospheric coherent length; turbulence profile; Rayleigh beacon; focused laser beam

## 1 引言

光波在湍流大气中传输时, 光波参数(强度、相位以及传播方向等)因湍流扰动而起伏, 这种起伏是由空气密度即空气折射率随机变化导致的<sup>[1]</sup>, 因此对大气折射率结构常数的测量, 可以为研究光束的漂移和扩展、图像的传输等提供依据。现在测量湍流廓线的手段主要有探空气球测量、风廓线微波雷达反演以及声雷达测量等方法, 但他们都有着各自的不足, 如数据均为非光波段直接测量、测

量精度不高、测量距离有限、需要其它参数配套测量等, 限制了测量的目标范围和精度。为此, 研制采用光波波段测量的湍流廓线激光雷达有着重要的意义, 具有广阔的应用前景和实用价值。

## 2 湍流廓线激光雷达原理简介

湍流廓线激光雷达基于瑞利信标的原理<sup>[2]</sup>, 即由雷达的发射系统发射一束聚焦激光束, 利用焦点处的大气后向散射, 形成一个瑞利信标, 作为雷达

接收系统的信标。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, 接收系统也需要相应调整接收望远镜的焦距和像增强器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, 如图 1 所示。

对散射回波信号的探测采用 Hartmann 法, 波前拟合用 Zernike 多项式。波前传感器测出每个 Hartmann 子镜焦平面上信标光的光斑重心, 由此可以得到该 Hartmann 子镜上相对应的信标光波前斜率, 进而可以得到 Zernike 多项式系数 [3-4]。Zernike 的各阶展开系数方差与大气相干长度的关系如表 1<sup>[5]</sup>, 通过表 1 我们可以求得待测空间内的

大气相干长度。

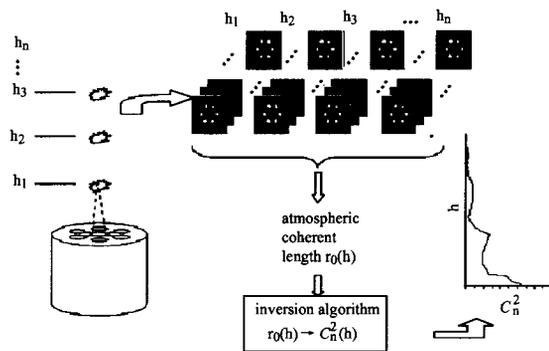


图 1 雷达原理

Fig.1 Principle of the imaging lidar system

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

Table 1 Variances of different Zernike orders caused by atmospheric turbulence obeyed Kolmogorov spectrum

Zernike order	Variance(rad <sup>2</sup> )	Zernike order	Variance(rad <sup>2</sup> )
1	0.4479(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>	8	0.0062(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>
2	0.448(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>	9	0.0062(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>
3	0.023(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>	10	0.0024(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>
4	0.023(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>	11	0.0024(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>
5	0.0232(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>	12	0.0024(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>
6	0.0061(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>	13	0.0024(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>
7	0.0062(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>	14	0.0024(D/r <sub>0</sub> ) <sup>5/3</sup>

Fried 在研究波前相位起伏的结构函数时, 引入了大气相干长度  $r_0$  的概念 [6], 其定义为

$$r_0 = \left[ 0.423k^2 \int_0^L C_n^2 dh \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

$$r_0 = \left[ 0.423k^2 \int_0^L C_n^2 (h/L)^{5/3} dh \right]^{-3/5} \quad (2)$$

其中 (1) 式适用于平面波, (2) 式适用于球面波。由于湍流廓线激光雷达接收的是聚焦光束的后向散射, 因此要用 (2) 式计算, 又因为我们是地面面向高空积分, 所以 (2) 式应该变为

$$r_0 = \left[ 0.423k^2 \int_0^L C_n^2 (1 - h/L)^{5/3} dh \right]^{-3/5} \quad (3)$$

在实际应用中, 我们可以认为  $C_n^2$  在一定空间间隔内是相等的, 于是 (2) 式又变为

$$r_0^{-5/3}(z_i) = 0.423k^2 \sum_{j=1}^i C_n^2(z_j) \int_{z_{j-1}}^{z_j} \left(1 - \frac{h}{z_i}\right)^{5/3} dh, \quad (4)$$

当用平面波时

$$r_0^{-5/3} = 0.423k^2 \sum_{j=1}^J (C_{jn}^2 \Delta L_j), \quad (5)$$

写成向量形式为

$$g = Wf, \quad (6)$$

其中  $g$  是测量所得量,  $f$  是未知量,  $W$  是系数矩阵。只要测量出不同高度的  $r_0$ , 通过 (6) 式, 理论上可以得到所测空间的湍流廓线。

### 3 实验验证

在下垫面比较均匀的情况下, 可以认为水平方

向大气折射率结构常数是相等的, 这时 (3) 式变为

$$r_0^{-5/3} = 0.159k^2 C_n^2 L. \quad (7)$$

为了验证这种利用波面误差反演大气结构常数的正确性, 我们在 400~1000 m 的水平方向做了大量的实验, 并且在 1000 m 处放置了一个激光器作为点光源, 当采用点源信标时就成为一个传统意义上的大气相干长度仪。利用波面误差反演的大气相干长度和传统点源信标测量的相干长度的比值关系如图 2 所示, 横坐标为激光雷达测量值, 纵坐标为点源信标测量值。图 3 是利用波面误差反演得到的在水平方向从 440 m 到 1000 m 的 10 组折射率结构常数廓线。

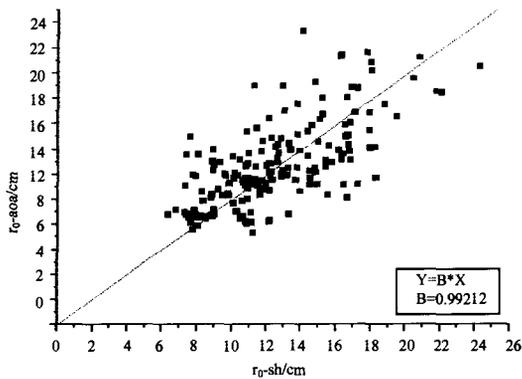


图 2 激光雷达测量与传统方法测量的  $r_0$  比值

Fig.2 Comparison of the  $r_0$  fluctuation variances between echo wave and fixed point-source

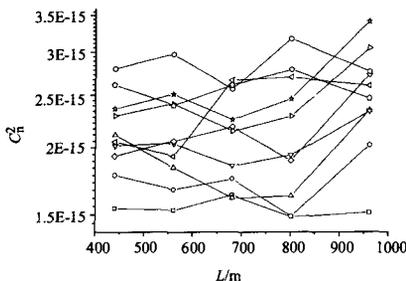


图 3 反演的水平方向的  $C_n^2$

Fig.3 Retrieved horizontal  $C_n^2$

通过图 2 我们可以看出, 严格控制测量空间间隔以及两种方法测量时的时间跨度, 两种方法测量的相干长度具有很好的相似度, 也就证明了利用波面误差法测量大气相干长度是可行的。进而也就

证明了利用波面误差法测量符合 Kolmogorov 谱的湍流的折射率结构常数的方法是可行的。图 3 中的误差主要由下面两方面引起: 在反演折射率结构常数时, 我们假设水平方向的湍流强度是相等的, 但是实验场地的下垫面既有草地, 又有水面和部分乡村, 这样的假设会引入部分误差; 另外, 实验数据是通过测量多点间的相干长度获得的, 不同点之间的测量有一定的时间跨度, 在这个时间间隔内, 湍流会产生一定的变化。

#### 4 湍流强度廓线的获得

通过水平方向的实验, 我们验证了利用波面误差测量大气折射率结构常数的方法的正确性, 但是垂直方向的测量要复杂的多, 对此我们进行了数值模拟。

先根据 Hufnagel-Valley 模型, 运用 (3) 式求出不同高度对应的大气相干长度, 然后用 (6) 式进行反演。因为近地面的折射率结构常数要比高层的大几个数量级, 如果我们把反演问题简单地处理成线性系统是不合适的, 因为直接按照 (6) 式计算的话, 底层的误差很容易传递到高层, 引起反演结果的失真, 为了解决这个问题, 我们提出把球面波的测量结果修正成平面波的形式, 然后再反演, 这样就不存在误差的传递问题, 具体方法是: 将 Hufnagel-Valley 模式代入 (1) 式和 (3) 式, 分别求出球面波和平面波对应的不同高度的大气相干长度  $r_0(h)$ , 然后求出球面波和平面波所对应的  $r_0(h)$  的比值  $y(h)$ ,  $y(h)$  的拟合模式为

$$y(h) = 0.7 \exp(-h/324.4) + 1.1, \quad (8)$$

合肥地区折射率结构常数的拟合模式为

$$\begin{aligned} \bar{C}_n^2(h) = & 7.9 \times 10^{-30} h^{17} \exp(-h/0.8) + \\ & 7.5 \times 10^{-16} \exp(-h/0.3) + \\ & 5.1 \times 10^{-17} \exp(-h/6.1), \end{aligned} \quad (9)$$

模式的廓线如图 4 中实线所示。将 (9) 式代入 (3) 式求出不同高度所对应的球面波  $r_0(h)$ , 然后用 (8) 式进行修正后, 代入 (7) 式可求出反演廓线, 如图 4 中虚线所示。在利用 (6) 式计算时, 空间间隔的选取应位于 150~750m 之间。

另外, 对于垂直方向的湍流廓线的反演算法也可以参考 Zilberman<sup>[7]</sup> 和 Belenkiiand<sup>[8]</sup> 的文章。

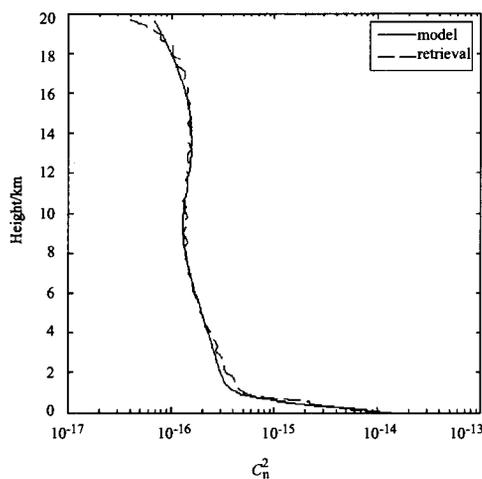


图 4 模式与反演廓线对比

Fig.4  $C_n^2$  model and the retrieved profiles

## 5 结 论

本文简述了湍流廓线激光雷达的原理, 通过实验验证了利用波面误差可以反演大气湍流折射率结构常数, 指出了用球面波反演湍流廓线的局限性, 提出了用平面波代替球面波反演湍流廓线的新思想, 通过现有模式分析了用球面波和平面波测量相干长度的差别, 并且将用这种方法反演的湍流廓线与实际廓线进行了比较, 发现有很好的相似度。用雷达测量湍流强度廓线这一方法处于刚刚起步阶段, 有待进一步在理论和实验上进行完善。

### 参考文献:

[1] Tatarski. *Wave Propagation in a Turbulent Medium* [M]. Trans. by Wen J S. Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese).

塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论 [M], 温景嵩 (译), 北京: 科学出版社, 1978.

[2] Zhang Wei, Luo Zhongxian, 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.

[3] Zhou Renzhong, Yan Jixiang. *Theory of Adaptive Optics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996 (in Chinese).

周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.

[4] Wang Yinjian, Wu Yi, Gong Zhiben. A numerical model for adaptive optics system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, 6(1): 59-64 (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] 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. 波相差与光束质量的关系 [J]. *中国激光*, 1999, 26(5): 415-419.

[6] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, 56: 1372-1379.

[7] Zilberman A, Kopeika N S. Lidar measurement of atmospheric turbulence vertical profiles [C]. *Proc. SPIE*, 2004, 5338:288-297.

[8] Belenkiiand M S, Mironov V L. Determination of the altitude profiles of the parameter in the atmosphere from the optical radar measurements [J]. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1974, 4:1256-1261.

作者简介: 白水成 (1980-), 男, 硕士, 从事大气湍流及测量仪器的研究。