

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2011.01.014

# 湍流强度廓线激光雷达测量的反演算法研究

马后永, 靖旭, 张守川, 吴毅

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

**摘要:** 湍流强度廓线激光雷达通过测量各层的大气相干长度来获得湍流强度廓线。从测量的大气相干长度直接反演湍流强度廓线会出现很大的噪声增益。介绍了一种通过求导并结合合理查森迭代方法来反演湍流强度廓线, 并对这种方法进行了数值模拟。通过反演两种典型系数下的 Hufnagel-Valley(H-V)  $C_n^2$  模式廓线, 两参数下反演廓线和原始廓线的平均相对误差分别为 7.8% 和 10.6%, 结果表明该算法具有较高的精度。

**关键词:** 大气光学; 激光雷达; 反演算法; 数值模拟; 光学湍流

中图分类号: TN249; P413

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2011)01-0087-04

## Inversion techniques for turbulence profile lidar

MA Hou-yong, JING Xu, ZHANG Shou-chuan, 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:** Turbulence intensity profile can be obtained by turbulence intensity profile lidar system through measuring a set of atmospheric coherence length. However, direct inversion from measured atmospheric coherence length data can result in a high noise gain. A new approach, which combines slope and Richardson method, was developed and its numerical simulation were performed. By recovering two representative Hufnagel-Valley(H-V)  $C_n^2$  profiles, the average relative errors between initial profile and recovery profile are 7.8% and 10.6%, respectively. Numerical results demonstrate that this method has a good precision.

**Key words:** atmospheric optics; lidar; inversion; numerical simulation; optical turbulence

## 1 引言

在研究激光大气传输的过程中, 大气湍流强度及其廓线是影响传输效应的重要因素, 探空式测量、风廓线微波雷达及声雷达测量<sup>[1,2]</sup>等手段, 对激光大气传输要求的大气湍流强度及其廓线测量都有各自的局限性, 因此, 我们研制了一种利用成像激光光斑测量大气湍流强度廓线的湍流强度廓线激光雷达<sup>[3]</sup>, 通过测量分层大气湍流的光束波面变化, 获取各层的大气相干长度。根据各层的大气相干长度, 并采用一定的算法, 反演出大气湍流强度廓线。目前, 文献 [4] 提出了一种利用平面波近似算法反演湍流强度廓线的方法, 由于湍流强度廓线激光雷达接收的是有限距离聚焦光束的后向散射, 因此用平面波近似算法会产生较大的误差。但采用球面波方程反演时则会受到球面波方程权重因子的影响, 会使反演结果出现物理上没有意义的负值, 因此我们提出了基于球面波方程的湍流强度廓线反演算法。

**基金项目:** 中国科学院科技创新基金项目资助课题 (CXJJ-245) 资助

**作者简介:** 马后永 (1985 -), 从事激光雷达相关算法的研究。 E-mail: mhy6156869@yahoo.com.cn

**导师简介:** 吴毅 (1960 -), 研究员, 主要从事激光大气传输的研究。 E-mail: wuyi@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2010-03-23; **修改日期:** 2010-04-27

## 2 原 理

大气湍流廓线激光雷达接收的是有限距离聚焦光束的后向散射信号, 对于相干长度的测量而言  $r_0$  须用球面波公式来表述<sup>[5]</sup>, 由于我们讨论的是垂直廓线的测量, 于是

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

其中  $h$  是光束的聚焦点高度。我们用  $C$  来代替折射率结构常数  $C_n^2$ , 令  $M = \frac{r_0^{-5/3}}{0.423k^2}$ , (1) 式可写为

$$M(h) = \int_0^h C(h')(1-h'/h)^{5/3} dh', \quad (2)$$

在实际的应用中对  $r_0$  的测量是在一系列高度  $h_i (i = 1, 2, \dots, n)$  上进行的, 我们假定在每两个相邻的测量高度区间内  $C(h)$  近似为一个常数, 即

$$C(h) = C_j, (h_{j-1} < h < h_j), \quad (3)$$

结合方程 (2) 和 (3), 在高度为  $h_i$  的测量函数可以表示为

$$M_i = \sum_{j=1}^i C_j \int_{h_{j-1}}^{h_j} (1-h'/h)^{5/3} dh', \quad (4)$$

在  $j \leq i$ , 对方程 (4) 进行积分

$$G_{ij} = \frac{3}{8} h_i \left[ 1 - (1-h'/h)^{8/3} \right]_{h'=h_{j-1}}^{h'=h_j}, \quad (5)$$

$G_{ij}$  在  $j > i$  时为 0, 方程 (4) 可以写成

$$M_i = \sum_{j=1}^n G_{ij} C_j. \quad (6)$$

根据大气相干长度  $r_0$  的一系列测量值可以计算出  $M$  的值, 通过方程 (6) 可以计算出相应的大气折射率结构常数  $C$ , 但实际情况是通过方程 (6) 求解会出现不符合实际物理意义上的负值解, 究其原因方程 (2) 的权重函数是问题的关键。

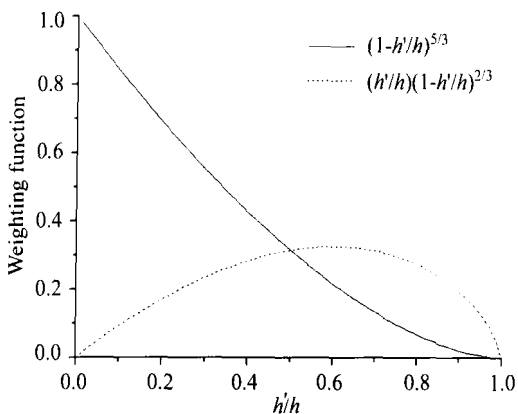


Fig.1 Weighting function

$$K_G(h, h') = (1-h'/h)^{5/3}. \quad (7)$$

如图 1 我们知道当  $h'$  接近  $h$  时,  $K_G$  接近于 0,  $G_{ii}$  会变得非常小, 在直接反演时如果低层  $C$  出现一个小扰动, 那么在高层  $C$  就会出现很大的扰动, 进而  $C$  会出现没有物理意义的负值。下面我们介绍一种解决这个问题的方法。我们知道  $M(h)$  是高度  $h$  的函数, 求  $M(h)$  的导数记为  $S(h)$ <sup>[6]</sup>, 根据方程 (2) 得

$$S(h) = \int_0^h C(h') \left[ \frac{5}{3} h' (1-h'/h)^{2/3} / h^2 \right] dh', \quad (8)$$

用方程 (6) 的近似, 在高度  $h_i$  的导数为

$$S_i = \sum_{j=1}^i C_j \int_{h_{j-1}}^{h_j} \left[ \frac{5}{3} h' (1-h'/h)^{2/3} / h_i^2 \right] dh', \quad (9)$$

在  $j \leq i$  时对方程 (9) 积分

$$U_{ij} = \left[ \frac{3}{8} - \left( \frac{3}{8} + \frac{5}{8} h'/h \right) (1 - h'/h)^{5/3} \right]_{h'=h_{j-1}}^{h'=h_j}, \quad (10)$$

在  $j > i$  时,  $U_{ij}$  为 0, 方程 (9) 可以写为

$$S_i = \sum_{j=1}^i U_{ij} C_j = \sum_{j=1}^n U_{ij} C_j, \quad (11)$$

由方程 (6) 和 (11) 可知, 二者在形式上是一样的, 但是矩阵  $U$  和  $G$  的差别却很大, 图 1 也给出了式 (8) 的权重函数

$$K_U = (h'/h)(1 - h'/h)^{2/3}. \quad (12)$$

由图 1 知方程 (8) 的权重函数  $K_U$  在  $h'$  接近 0 和  $h$  时的值都较小, 这样在反演时低层  $C$  扰动就不会对高层产生太大的影响, 反演时我们采用的是理查森迭代方法<sup>[7]</sup>, 具体步骤如下: 把方程 (11) 写成矩阵的形式

$$S = UC, \quad (13)$$

其中  $S$  为  $M$  的导数, 把 (13) 式写成如下的等价形式

$$C = (I - U)C + S, \quad (14)$$

进而 (14) 可以写成

$$C^k = (I - U)C^{k-1} + S = C^{k-1} + r^{k-1}. \quad (15)$$

的迭代过程, 其中  $r^{k-1}$  是残差向量,  $r^{k-1} = S - UC^{k-1}$ ,  $I$  为单位矩阵, 理查森迭代会产生 (13) 式的一个解。

### 3 数值模拟

数值模拟时我们采用的是 Hufnagel-Valley(H-V)  $C$  模式廓线<sup>[8]</sup>, H-V 模式廓线描述如下

$$C(h) = 0.00594 \left( \frac{V}{27} \right)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{h}{100}\right), \quad (16)$$

其中  $V$  为均方根风速单位 m/s,  $A$  为地面层的湍流强度即  $C(0)$ , 单位  $m^{-2/3}$ , 图 2 给出了数值模拟的结果, 其中反演的高度为 15 km, 分辨率为 100 m。

从图 2(a) 和 (b) 知对方程 (1) 进行变形求导后, 采用理查森迭代方法反演 H-V 模式廓线得到了较好的反演精度, 另外当迭代次数足够大以后迭代结果是稳定的且迭代初始值选定为一个常数, 而最终的结果是与初始值无关的。为了描述反演的精度我们对反演廓线和原始廓线的各点数据进行了分析, 求得了各点的平均相对误差, 其中图 2(a) 为 7.8%(b) 为 10.6%。在图 2 中我们也看到了低层反演的结果和原始廓线基本完全重合, 但是高层反演的结果沿原始廓线扰动, 主要的原因是由于在对方程 (1) 进行离散求导时导数

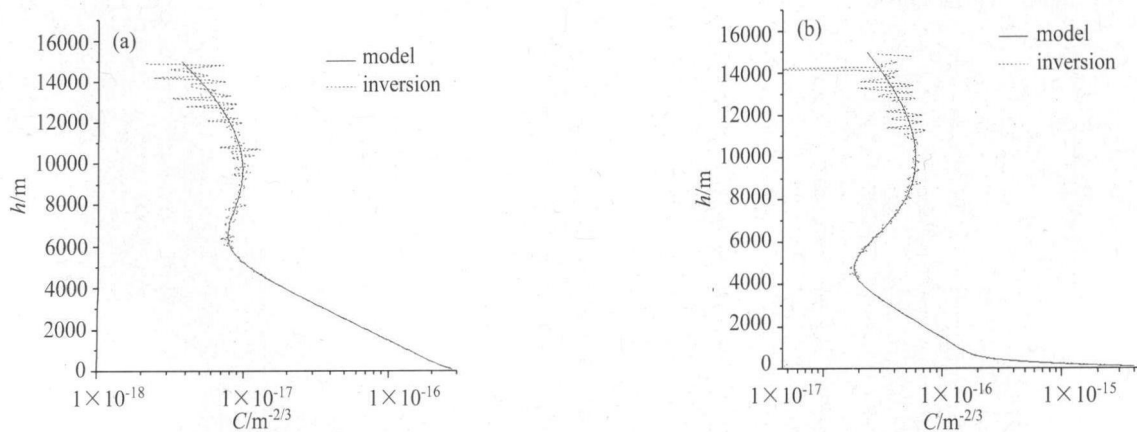


Fig.2 Recovery of H-V turbulence profile (a) $V = 16$  m/s,  $A = 6.0 \times 10^{-17}$  (b) $V = 40$  m/s,  $A = 1 \times 10^{-14}$

会出现误差, 而低层折射率结构常数  $C$  与高层相比一般大两个量级以上, 所以这种导数误差对高层的影响远大于低层。

#### 4 结 论

我们提出了一种用于湍流廓线激光雷达反演廓线的方法, 这种反演方法基于球面波方程, 通过对球面波方程求导并结合查森迭代方法, 克服了以往不能用球面波方程直接反演的问题。从对 H-V 模式廓线数值模拟的反演结果来看反演的精度较好。但目前这种方法应用在湍流廓线激光雷达的测量数据反演方面仅仅处于数值模拟阶段, 实际的应用中仍有很多问题需要解决, 比如实际测量中由于信噪比的原因会导致大气相干长度的测量出现误差等等, 这些问题仍然需要进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Xiao Liming, *et al.* Comparison of some methods of measuring refractive index structure parameter [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, 20(6): 755-761 (in Chinese).
- [2] Weng Ningquan, Xiao Liming, *et al.* The theory and experimental verification of 915M microwave radar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2001, 18(1): 92-96 (in Chinese).
- [3] Hou Zaihong, Wu Yi, Zhang Shouchuan, *et al.* Development of turbulence profile lidar [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2006, 18(10): 3060-3063 (in Chinese).
- [4] Bai Shuicheng, Wu Yi, Hou Zaihong, *et al.* The study of measurement of turbulence profiles using lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics* (大气与环境光学学报), 2007, 2(3): 194-197 (in Chinese).
- [5] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, 56: 1372-1379.
- [6] Gatland I, Stewart J M, Gimmetad G G. Inversion techniques for the differential image motion lidar [C]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7324: 73240C-1-73240C-8.
- [7] David Kincaid, Ward Cheney. *Numerical Analysis* [M]. Pacific Grove, California, 1991, 184-185.
- [8] Zilberman A, Kopeika N S. LIDAR measurements of atmospheric turbulence vertical profiles [C]. *Proc. of SPIE*, 2004, 5338: 288-297.