

湍流廓线激光雷达的数据处理方法

封双连, 强希文, 宗 飞, 李志朝, 常金勇, 赵军卫, 吴 敏, 江 钰

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 湍流廓线激光雷达是近十年出现的测量大气湍流强度廓线的新技术, 目前数据处理已成为该技术的关键环节。对湍流廓线激光雷达的数据处理方法进行了详细地描述, 重点研究了双光斑图像背景阈值计算方法与大气湍流强度廓线反演算法。比较了迭代法、最大类间方差法和统计法三种背景阈值计算方法分别在强信号与弱信号下的计算结果, 得出统计法是比较适合双光斑图像的背景阈值计算方法。在背景阈值计算的基础上对图像进行分割并计算得到双光斑的质心距, 统计多帧图像的质心距起伏得到到达角起伏方差。然后利用 HV-21 模型模拟了从到达角起伏方差反演大气湍流强度廓线的算法, 所得结果与原始值大小相近、整体变化趋势一致, 但是不能反映原始值的细节变化趋势。

关键词: 大气湍流廓线; 大气折射率结构常数; 激光雷达; 数据处理; 背景阈值

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0220-05

Data processing techniques for turbulence profile Lidar

Feng Shuanglian, Qiang Xiwen, Zong Fei, Li Zhichao, Chang Jinyong, Zhao Junwei, Wu Min, Jiang Yu

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The atmospheric turbulence profile Lidar is a new technique presented near ten years which is used to measure the optical turbulence altitude profile. Nowadays data processing becomes a significant problem of this technique. The data processing methods of the turbulence profile lidar were described in detail. Methods to calculate threshold values of dual light spot images and inversion of atmospheric turbulence profile were studied mainly. These threshold values calculated by iterative method, maximum classes variance method and statistic method were compared with each other, statistic method was an appropriate method to calculate threshold values of dual light spot images. And then coordinates of dual light spot were obtained and centroid distances were calculating based this threshold values. Arrival angle fluctuations were computed with centroid distances of multiple images. Inversion of atmospheric turbulence profile from arrival angle fluctuations was simulated with HV-21 model. These values retrieved and original data were in same magnitudes and same integrative trend but differed in partial curvilinear trend.

Key words: atmospheric turbulence profile; atmospheric refractive index structure parameter; Lidar; data processing; threshold value

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 国家重点实验室基金(SKLLIM1405)

作者简介: 封双连(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事大气光学技术研究。Email: 13899090943@163.com

0 引言

激光束在大气中传输时,由于大气湍流所导致的折射率起伏,会产生光束漂移、光束扩展、光强闪烁和相位起伏等效应,从而破坏了激光束的相干性,使激光束波前发生畸变^[1-2]。测量沿激光传输路径的大气湍流强度对于研究激光大气传输效应有着重要意义。传统的大气湍流强度廓线测量方法如气球探空法、声雷达、微波雷达和 Scidar 法等,在实时实路径测量上都有各自的局限性^[3-5]。近十年出现了一种利用激光信标测量大气湍流强度廓线的湍流廓线激光雷达^[6],能够较为实时地测量给定路径的大气湍流强度。文中重点对该技术的数据处理方法进行研究。

1 测量原理

基于激光信标的湍流廓线激光雷达测量原理为^[6]:通过发射系统发射一束激光束在设定高度聚焦,大气对焦点处激光光柱的后向散射形成激光信标。调节接收望远镜的焦距使其对焦点处成像,并相应设置 ICCD 相机的延迟时间和曝光时间,使 ICCD 只接收焦点处小段激光光柱的后向散射信号。如图 1 所示,在同一高度测量多帧图像,通过统计多帧图像两个光斑的质心距起伏计算出该高度的到达角起伏方差。改变发射系统/接收系统的焦距和 ICCD 的时间设置,依次测量获得多个高度的到达角起伏方差,通过一定的反演算法即可得到不同高度的大气折射率结构常数。

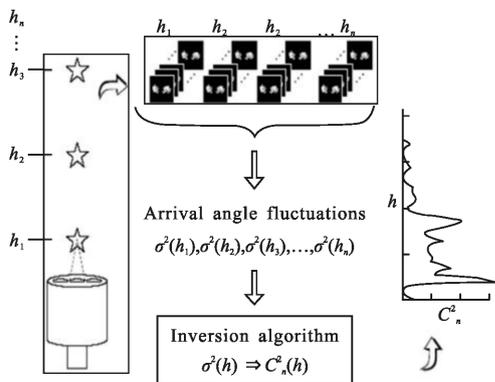


图 1 湍流廓线激光雷达测量原理

Fig.1 Measurement principle of turbulence profile Lidar

2 数据处理流程

假设测量 n 个高度,每个高度测量 m 帧图像,

那么最终输入的是 $m \times n$ 帧图像的灰度值,而要得到的是 n 个高度的大气折射率结构常数 C_n^2 。数据处理流程如图 2 所示,从单个高度单帧图像开始处理,首先计算单帧图像的背景阈值,利用计算的背景阈值对图像进行分割得到双光斑的坐标值,然后进行质心计算获得两个光斑的质心距。重复计算单个高度的 m 帧图像的质心距,统计其方差起伏得到单个高度的到达角起伏方差。再转到下一个高度的图像进行处理,循环计算得到 n 个高度的到达角起伏方差,最后通过一定的反演算法反演得到 n 个高度的 C_n^2 。在数据处理流程中,主要的技术点在图像处理和最后的 C_n^2 反演。

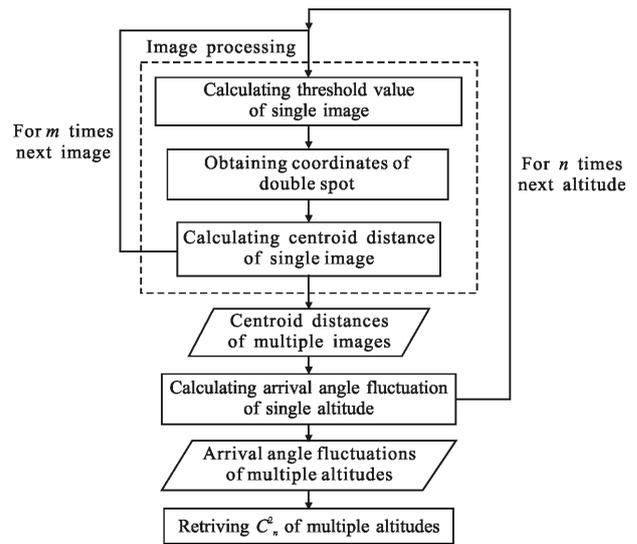


图 2 数据处理流程图

Fig.2 Flow chart of data processing

3 图像处理

双光斑图像处理的实质是为了求取两个光斑之间的质心距,主要包括图像背景阈值计算、图像阈值分割和质心计算过程。图像处理的关键在于自动选择一个合适的背景阈值,使图像阈值分割得到满意的结果,准确提取光斑的坐标,使质心计算的结果较为准确。

3.1 背景阈值计算

背景阈值计算的目的是以一定的准则找出一个灰度值 T 作为背景阈值,在阈值分割的时候将灰度值小于等于 T 的部分作为背景,而灰度值大于 T 的

部分作为目标。如果背景阈值选取过高,则过多的目标点被误归为背景,阈值选的过低,则背景被误归为目标,均会影响质心计算的准确度。

近几十年,国内外学者对阈值选取进行了大量的研究,提出了很多经典的算法。例如迭代法、最大类间方差法(Otsu 法)等多种类型阈值选取方法^[7]。光斑图像具有目标面积相对小、背景面积大的特点。经研究,迭代法与最大类间方差法计算结果相差无几。在目标灰度远大于背景灰度时,两种方法计算的背景阈值均大于图像背景灰度的均值;当目标灰度与背景灰度接近即信噪比较低时,采用迭代法与最大类间方法计算的背景阈值接近于图像背景灰度的均值。针对上述情况,采用一种统计方法计算背景阈值。假设全图像灰度矩阵为 I , 图像灰度的最小值为 I_{\min} , 迭代法计算的背景灰度值为 bj_0 。计算图像中灰度值小于 bj_0 所有像素点的灰度值均值为 u_0 ($u_0 = \text{mean}(I < bj_0)$), 再重新在区间 $[I_{\min}, 2 * u_0 - I_{\min}]$ 内分别均值 u_1 和均方差 u_2 , 那么可定义新的背景阈值 bj_1 为:

$$bj_1 = u_1 + k * u_2 \quad (1)$$

式中: k 表示置信因子, 取 $k=2.6$ 时, 表示 bj_1 中包含了 99.5% 的样本。

分别利用三种方法计算背景阈值, 然后将图像进行二值化, 结果如图 3 所示。图(a)代表迭代法的结果, 图(b)代表最大类间方差法的结果, 图(c)代表统计方法的结果。可以看出, 在强信号时, 迭代法和最大类间方差法计算的背景阈值结果偏大, 使得实际

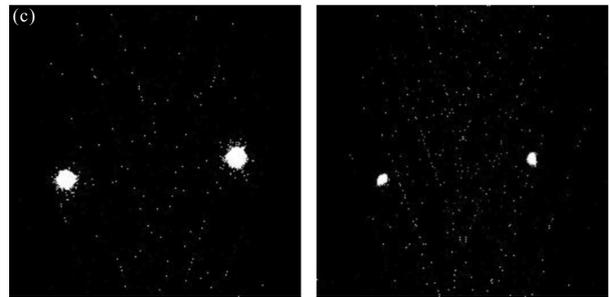


图 3 不同背景阈值下的二值化图像

Fig.3 Binarization image of variant threshold values

光斑面积偏小;而在弱信号时,迭代法和最大类间方差法计算的背景阈值结果偏小,光斑区域与背景区域不容易区分。而统计方法计算的结果较为适中,能够自动调节前两种算法计算结果在强信号时偏大和弱信号时偏小的问题。具体计算结果如表 1 所示。

表 1 背景阈值计算结果

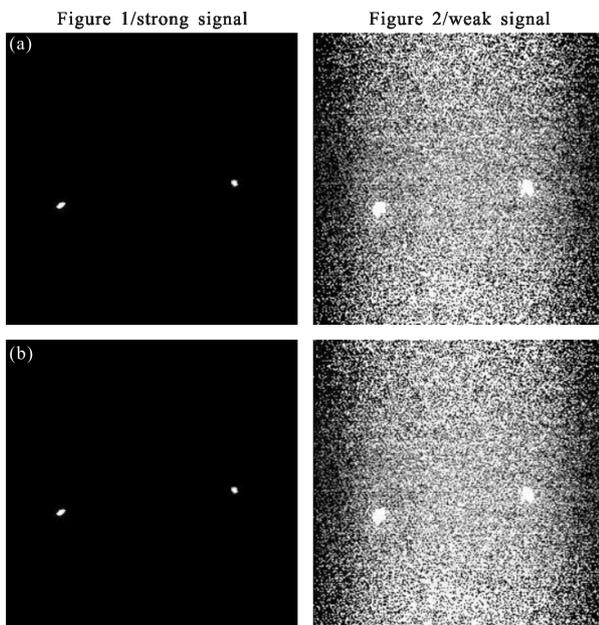
Tab.1 Computing results of image threshold

	Mean value	Max-imum	Threshold value		
			Iterative method	Otsu method	Statistical method
Figure 1	610	18 160	4 953	49 58	651
Figure 2	600	1 135	600	599	647

3.2 图像阈值分割

图像阈值分割是根据计算的背景阈值, 找出图像中灰度值大于背景阈值的连通区域。常用的方法有区域生长法。区域生长法的基本思想是通过一个初始种子, 将种子周围具有相似性质的像素归并到种子像素所在的区域。具体算法描述为: 在光斑图像中选出灰度值最大的像素 P_1 , 从 P_1 点出发向该点的邻域(如 4 邻域或 8 邻域)搜索, 若搜索点的灰度值大于背景阈值, 则认为此点属于同一连通区域, 并做标记 L_1 , 同时将标记点的灰度值归 0, 用此原理向四周搜索, 直到找不到大于背景阈值的像素点为止。此时 L_1 连通区域像素点灰度值已归 0, 再寻找下一个灰度值最大的像素 P_2 , 进行上面所说的搜索, 找出连通区域 $L_2 \dots$ 依次进行 n 次搜索, 找出 n 个连通区域, 在 n 个连通区域里像素点最多的两个即为光斑区域。根据标记 $L_{\max 1}$ 和 $L_{\max 2}$ 的像素点坐标即可以分别计算中两个光斑的质心。

根据找出的两个光斑的像素点坐标采用重心法



计算出单个光斑的质心坐标,再计算两个光斑的质心距。

4 大气湍流强度廓线反演

4.1 反演算法^[9]

对同一高度采集多帧图像,求出图像的质心位置与质心距,利用公式(2)计算出到达角起伏方差。在一定时间间隔内,采集 m 帧图像,第 i 帧图像的两个像点中心距为 b_i ,并望远镜系统的焦距为 f_0 ,则到达角起伏方差 σ_{DIM}^2 为:

$$\sigma_{DIM}^2 = \frac{(\overline{B_i^2} - \overline{B_i}^2)}{f_0^2} \quad (2)$$

$$\overline{B_i^2} = (\sum b_i^2)/m \quad \overline{B_i}^2 = (\sum b_i/m)^2$$

获得多个高度信标光的到达角起伏方差后,就可以对大气湍流强度进行反演。到达角起伏方差与大气湍流强度的关系为:

$$\sigma_{DIM}^2(h) = 33.2(0.358d_0^{-1/3} - 0.242d_s^{-1/3}) \times \int_0^h C_n^2(h')(1-h'/h)^{5/3} dh' \quad (3)$$

式中: d_0 为接收望远镜子瞳直径; d_s 为接收望远镜两个子瞳中心的间距, $C_n^2(h)$ 为高度 h 处的大气湍流强度; h 为望远镜子瞳中心连线至激光信标的距离。

公式(3)中各参数均为连续变量,在实际测量中仅给出离散的一定数量不同高度处的差分像运动方差的测量值,所以,必须给出上式的离散表达式。为了方便起见,以下利用 $C(h)$ 表示 $C_n^2(h)$,并定义 $M(h)$ 为:

$$M(h) = \int_0^h C(h')(1-h'/h)^{5/3} dh' \quad (4)$$

式中: $M(h)$ 与差分像运动方差 σ_{DIM}^2 的区别仅为一个常数因子。所以,大气湍流强度的反演问题就可以归结为从 $M(h)$ 来反演 $C(h)$ 。

如果函数 $M(h)$ 为解析函数或者可以利用一组具有光滑特性的数据给出,则可以利用方程(5)给出 $M(h)$ 的导数 $S(h)$,其中 $S(h)$ 与 $C(h)$ 的关系为:

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

利用公式(5),可给出在高度 h_i 处的斜率为:

$$S_i = \sum_{j=1}^i C_j \int_{h_{j-1}}^{h_j} \left[\frac{5}{3} \frac{h'}{h_i^2} \left(1 - \frac{h'}{h_i} \right)^{2/3} \right] dh' \quad (6)$$

当 $j \leq i$ 时,上式中的积分为:

$$U_{ij} = \left[\frac{3}{8} - \left(\frac{3}{8} + \frac{5}{8} \frac{h'}{h_i} \right) \left(1 - \frac{h'}{h_i} \right)^{5/3} \right]_{h'=h_{j-1}}^{h'=h_j} \quad (7)$$

当 $j > i$ 时, U_{ij} 取值为零。这样,公式(7)可表示为:

$$S_i = \sum_{j=1}^i U_{ij} C_j = \sum_{j=1}^n U_{ij} C_j \quad (8)$$

其逆矩阵为:

$$C_i = \frac{1}{U_{ij}} \left(S_i - \sum_{j=1}^{i-1} U_{ij} C_j \right) \quad (9)$$

$M(h)$ 可采用下面的函数形式进行拟合。

$$M(h) = \mu_1 h / (h + b_1) + \mu_2 [h / (h + b_2)]^2 \quad (10)$$

4.2 模拟反演

利用常用的湍流模型 HV-21 模型模拟上述反演算法。HV-21 模型^[10]为:

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} (\bar{v}/27)^2 h^{10} \times \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + 1.7 \times 10^{-14} \exp(-h/100) \quad (11)$$

式中: \bar{v} 为风速因子,取为 21 m/s; h 的单位为 m; C_n^2 的单位为 $m^{-2/3}$ 。

假设测量时大气湍流符合 HV-21 模型,测量时采样取点为 0.2、0.5、0.9、1.4、2、3、5、8、12、20 km 共 10 个点,利用公式(3)和湍流模型公式(11)计算的到达角起伏方差即可代表笔者测量得到的到达角起伏方差。取 $d_0=0.1$ m, $d_s=0.46$ m,这 10 个点的到达角起伏方差如图 4 中“■”所示。

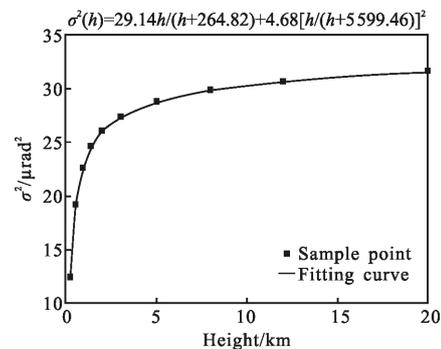


图 4 到达角起伏方差采样点及拟合曲线

Fig.4 Sample points and fitting curve of σ^2

那么利用这 10 个点的反演 C_n^2 的过程如下:首先利用公式(10)对这些数据进行拟合如图 4 所示。

求得该式的 4 个参数 μ_1, μ_2, b_1, b_2 。然后求该式的导数, 得到其导数的解析函数 $s(h)$ 。代入 10 个点的高度得到 s_i ; 利用 10 个高度值构造矩阵 U_{ij} , 最后用公式(9) 计算得到 C_n^2 , 如图 5 所示。与 HV-21 模型进行对比可以看出, 反演得到的 C_n^2 大小与 HV-21 模型的值相近, 整体变化趋势一致。但是不能反映 C_n^2 值随高度变化趋势的细节, 这种反演算法存在局限性。

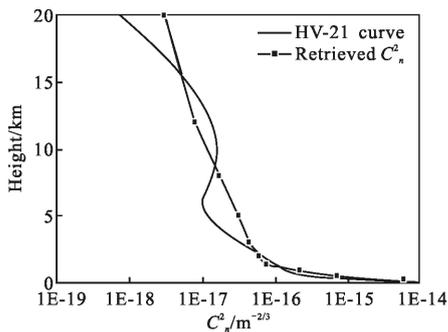


图 5 C_n^2 曲线

Fig.5 Curve of C_n^2

5 结论

利用激光信标测量大气湍流强度廓线的湍流廓线激光雷达是近十几年出现的新技术, 随着该技术的发展, 其工程上的难题已基本解决, 数据处理逐渐成为其中的关键环节。文中详细描述湍流廓线激光雷达的数据处理方法, 重点对图像的背景阈值计算方法与大气湍流强度反演算法进行了研究。针对双光斑图像的特点, 比较迭代法、最大类间方差法和统计法三种背景阈值计算方法在强信号与弱信号情况下的计算结果后, 认为统计法是比较适合双光斑图像的背景阈值计算方法。利用 HV-21 湍流模型模拟大气湍流强度反演算法, 反演得到的大气湍流强度 C_n^2 大小与 HV-21 模型的值相近, 整体变化趋势一致, 但是不能反映 C_n^2 值随高度变化趋势的细节。因此, 从实用性上来看, 该反演算法能够有效对大气湍

流强度进行反演, 但仍需进行改进, 使其能够得到 C_n^2 值随高度的细节变化趋势。

参考文献:

- [1] Rao Ruizhong. Introduction to Turbulence Atmospheric Optics [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 2005: 6-8. (in Chinese)
- [2] Rao Ruizhong. Combined effect of turbulence and thermal blooming of laser propagation in atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 130-134. (in Chinese)
- [3] Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Xiao Liming, et al. Comparison of some methods of measuring refractive index structure parameter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20 (6): 755-761. (in Chinese)
- [4] Weng Ningquan, Xiao Liming, Gong Zhiben. The theory and experimental verification of 915M microwave radar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(1): 92-96. (in Chinese)
- [5] Ni Zhibo, Huang Honghua, Huang Yinbo, et al. Atmospheric turbulence profile measurement techniques based on scintillation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 160-165. (in Chinese)
- [6] Hou Zaihong, Wu Yi, Zhang Shouchuan, et al. Development of turbulence profile lidar [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1602-1604. (in Chinese)
侯再红, 吴毅, 张守川, 等. 湍流廓线激光雷达的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(10): 1602-1604.
- [7] Otsu N A. Threshold selection method from gray-level histogram [J]. *IEEE Transaction System Man and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [8] Hu Bin, Gong Ningsheng. An improved Otsu's thresholding segmentation method [J]. *Microelectronics & Computer*, 2009, 26(12): 153-155. (in Chinese)
- [9] Ian Gatland, John M Stewart, Gary G Gimmestad. Inversion techniques for the differential image motion lidar[C]//SPIE, 2009, 7324: 73240C_1-73240C_8.
- [10] Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 130. (in Chinese)