

光学学报

激光雷达反演大气边界层高度的优化方法

于思琪^{1,2,3}, 刘东^{2,3*}, 徐继伟^{2,3,4}, 王珍珠^{2,3}, 吴德成^{2,3}, 钱立勇^{2,3,4}, 毛敏娟⁵, 王英俭^{1,2,3}

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

⁴中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

⁵浙江省气象科学研究所, 浙江 杭州 310008

摘要 由于大气中气溶胶垂直分布复杂,常用的梯度法和小波协方差变换法在边界层高度自动连续识别方面仍具有较大的不确定性。选取在浙江金华两个时间段内观测得到的双波长激光雷达数据,将二维矩阵方法应用于复杂大气垂直分布情况下边界层高度的反演,从距离和时间两个维度优化边界层高度的反演结果。研究表明,在气溶胶垂直分布出现多层结构的情况下,小波协方差变换法反演的边界层高度有较大的误差,而二维矩阵方法具有一定的优势。在 532 nm 波长基于二维矩阵方法和小波协方差变换方法反演的边界层高度与 1064 nm 波长基于小波协方差变换方法反演的边界层高度的相关系数分别为 0.87 和 0.37。边界层高度与地面温度变化趋势一致,表明边界层高度的反演结果是可靠的。二维矩阵方法为进一步改善无云情况下(3 km 以内无云层出现)激光雷达自动连续识别边界层高度可靠性提供了很好的借鉴与参考。

关键词 遥感; 激光雷达; 大气边界层高度; 小波协方差变换法; 二维矩阵方法

中图分类号 P407.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0728002

Optimization Method for Planetary Boundary Layer Height Retrieval by Lidar

Yu Siqu^{1,2,3}, Liu Dong^{2,3*}, Xu Jiwei^{2,3,4}, Wang Zhenzhu^{2,3},

Wu Decheng^{2,3}, Qian Liyong^{2,3,4}, Mao Minjuan⁵, Wang Yingjian^{1,2,3}

¹ School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

² Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

³ Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China;

⁴ Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

⁵ Zhejiang Meteorology Science Institute, Hangzhou, Zhejiang 310008, China

Abstract Due to the complex vertical distribution of aerosols in the atmosphere, the commonly used gradient method and wavelet covariance transform (WCT) method still have large uncertainties in automatically and

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-11-10; 录用日期: 2020-11-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41875033, 41975038)、“一带一路”国际科学组织联盟联合研究合作专项(AN-SO-CR-KP-2020-09)、中国科学院国际合作局对外合作重点项目(116134KYSB20180114)、中国科学院青年创新促进会人才项目(2017482)、中国科学院大气光学重点实验室开放课题基金项目(JJ-2018-01)

* E-mail: dliu@aiofm.ac.cn

continuously identifying the planetary boundary layer height (PBLH). For this reason, we applied the 2-D matrix method to the retrieval of PBLH in two cases observed by a dual-wavelength lidar over Jinhua city. The 2-D matrix method optimizes PBLH retrieval results from the distance and time dimensions. The results show that in the case of profiles with multi-layer aerosols, the 2-D matrix method is superior to the WCT method in terms of PBLH retrieval. The correlation coefficient between the PBLH retrieved by the 2-D matrix method at 532 nm and that by the WCT method at 1064 nm is 0.87. However, the correlation coefficient is only 0.37 if the 2-D matrix method is replaced by the WCT method at 532 nm. Additionally, the consistent variation trend in PBLH and surface temperature indicates reliable PBLH retrieval results. The 2-D matrix method provides a reference for the automatic and continuous identification of the PBLH by lidar in the absence of low clouds (no clouds appearing below 3 km).

Key words remote sensing; lidar; planetary boundary layer height; wavelet covariance transform method; 2-D matrix method

OCIS codes 280.3640; 010.0280; 010.1350

1 引言

大气边界层(PBL)是存在各种尺度湍流活动,并存在显著日变化的低层大气^[1],近地面气溶胶和地表在吸收太阳短波辐射后会影响到边界层的演变。边界层的演变过程对污染物的扩散和云凝结核的输送起到了重要作用^[2],同时边界层也是天气预报和模式中需要考虑的重要因素^[3]。另外,大气气溶胶多聚集在边界层内^[4],与人类生活息息相关。

边界层高度(PBLH)是边界层的重要参数,其范围从数百米到几千米不等,随时间、空间的变化而发生改变。对边界层高度进行连续观测是研究边界层变化的有效途径。因此获取高时空分辨率的边界层高度观测数据具有重要意义。激光雷达是一种具有时空分辨率高、探测距离远、部署便捷等优势的主被动遥感设备,可以对大气进行连续的垂直探测,实时获取大气垂直结构,并能准确反映污染物的分布聚集情况与时空变化^[4-7]。该设备通过望远镜接收大气后向散射信号,以气溶胶作为示踪物间接反映边界层的高度变化,是边界层高度探测的有效手段^[5,8-12]。利用激光雷达对边界层高度进行反演的方法主要有梯度法^[13-14]、小波协方差变换法^[15-16]、阈值法^[17-18]等,还包括结合气溶胶参数对边界层高度进行反演的方法^[19]。用阈值法对大气边界层进行识别,需要后向散射信号有较高的信噪比(SNR),且在气溶胶垂直分布复杂的情况下,使用阈值法识别边界层高度存在困难^[20]。小波协方差变换法在用梯度法的基础上增加了低通滤波器^[19],多应用于激光雷达实时获取边界层高度。

小波协方差变换法是利用 Haar 小波协方差变换得到激光雷达大气后向散射回波信号的协方差廓线,再通过确定极值位置得到边界层的高度。对于边界层高度处存在明显的信号突变且边界层高度周

围的垂直梯度小的情况,小波协方差变换法能够反演得到有效的边界层高度。Haar 小波尺度的选取会受到边界层高度的信号跃变强度和边界层高度周围的垂直梯度大小的影响^[15]。针对大气回波信号中有气溶胶层结构位于边界层之上的情况,采用较小 Haar 小波尺度的小波协方差变换法获取边界层高度会存在较大误差,采用较大 Haar 小波尺度能够得到可靠的边界层高度结果,但会损失近地层信号结构^[21]。在边界层以上出现气溶胶层的情况下,利用 1064 nm 通道的回波信号反演的边界层高度比 532 nm 通道能够更好地反映边界层的演变,这是因为 1064 nm 波长相比 532 nm 波长,对大粒子更敏感,更容易反演得到可靠的边界层高度。

对于单波长弹性散射激光雷达通常采用 532 nm 通道观测大气气溶胶,在复杂的气溶胶垂直分布情况下,利用 532 nm 通道信号反演的边界层高度易受到多层气溶胶的影响。本文针对边界层以上出现气溶胶层的复杂大气垂直分布情况,理论模拟并分析 Haar 函数尺度参数选取对边界层高度识别的不确定性影响,并对选取的 2013 年 7 月 1 日和 2013 年 8 月 23 日本课题组在浙江金华实验中获得的双波长激光雷达数据,将包括梯度法、小波协方差变换方法和二维矩阵方法在内的 3 种反演方法应用到边界层高度反演实验中,以 1064 nm 波长信号反演的边界层高度为可靠结果(小波协方差变换方法和二维矩阵方法的结果相近的情况下),比较小波协方差变换方法和二维矩阵方法在 532 nm 波长下边界层高度反演结果的差异,分析二维矩阵方法在复杂大气气溶胶垂直分布情况下的反演优势。最后给出边界层高度演变随地面温度的变化情况。

2 实验仪器设备及数据介绍

本研究使用的激光雷达数据来自一台自主研发

的双波长米氏偏振拉曼激光雷达系统,简称 DMPRL^[22-23]。该激光雷达系统的发射光有 532 nm 和 1064 nm 两个波长,532 nm 波长激光由 1064 nm 波长激光经过二倍频获得,接收通道分别是 532 nm 垂直、532 nm 平行、607 nm 和 1064 nm 4 个通道。

获得的激光雷达数据的时间分辨率为 30 s,空间分辨率为 7.5 m。采用的激光雷达探测的边界层高度并非传统意义的边界层高度,而是利用大气气溶胶作为示踪物,将气溶胶后向散射信号由强变弱的地方确定为边界层高度。DMPRL 的设备参数详见表 1。

表 1 DMPRL 系统参数

Table 1 Parameters of the DMPRL system

Subsystem	Parameter	Item
Transmitter system	Wavelength	1064 nm/532 nm
	Pulse energy	100 mJ@1064nm/100 mJ@532 nm
	Pulse frequency	20 Hz
	Divergence	<0.3 mrad
	Linear polarization	>99%@532 nm
Receiver system	Diameter	300 mm
	Field of view	<0.5 mrad
	Filter bandwidth	0.3 nm@532 nm/0.3 nm@607 nm/0.5 nm@1064 nm
Data acquisition system	Optical sensor	PMT/APD
	Sample rate	20 MHz
	Resolution	16 bit

DMPRL 于 2013 年 6 月开始在浙江省金华市的浙江师范大学(119.65°N,29.14°E)进行大气垂直探测实验,数据采集时间为 2013 年 6 月至 2014 年 6 月,历时一年。金华位于浙中丘陵盆地地区,地势复杂,海拔高度差大,不利于大气中污染物扩散。金华地区 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的主要贡献源为工业源^[24]。局地气溶胶和传输气溶胶的多种气溶胶来源,加上复杂的地形结构,容易影响大气气溶胶的垂直分布,增加了利用激光雷达反演边界层高度的难度^[25]。对此次实验数据的分析,有利于边界层高度算法的优化和多层气溶胶结构复杂情况下边界层高度的连续反演。对边界层高度反演使用的数据是 DMPRL 中 532 nm 和 1064 nm 波长的大气回波信号。地面温度资料来源于就近的气象站点,该气象站点距离 DMPRL 观测地点 4 km 左右,时间分辨率为 1 h。

3 激光雷达反演边界层高度的方法

激光雷达具有很高的时间分辨率和空间分辨率,可以 24 h 无人值守连续观测,在连续探测边界层高度方面有很大的优势。在雷达数据进行边界层高度反演前,需要确定激光雷达回波信号具有较好的信噪比,因此要选择数据质量良好的信号进行边界层高度的反演。同时,在云底高度过低的情况下,也会影响边界层高度的识别。边界层高度通常在 100~3000 m 的范围内变化^[4],因此对于 3 km 以下出现云层回波信号的情况需要考虑云层出现对边界

层反演的影响。本文选取的观测时间段内 3 km 以下无云层回波信号存在,因此不涉及云层出现对边界层反演影响的讨论。

米氏散射激光雷达方程可以表示为

$$P(z) = C \frac{O(z)}{r^2} \beta(z) \exp\left[-2 \int_{z_0}^z \alpha(z') dz'\right], \quad (1)$$

式中: $P(z)$ 是激光雷达接收高度 z 处的大气后向散射回波信号的功率; C 为激光雷达系统常数; $O(z)$ 为几何因子; $\beta(z)$ 为高度 z 处的大气后向散射系数; $\alpha(z)$ 为高度 z 处的大气消光系数。 $P(z)$ 通过去背景和几何因子校正,再通过距离平方校正可以得到激光雷达的距离平方校正回波信号(RCS)。激光雷达将气溶胶作为示踪物,判断大气回波信号中的信号突变位置,并将其作为边界层高度。小波协方差变换法经过 Haar 函数的处理可以检测出大气回波信号的突变位置。

3.1 小波协方差变换法识别边界层高度

小波协方差变换(WCT)法利用 Haar 函数对距离校正信号进行协方差变换,具体可以表示为^[15]

$$h\left(\frac{z-b}{a}\right) = \begin{cases} +1, & b - \frac{a}{2} \leq z \leq b \\ -1, & b \leq z \leq b + \frac{a}{2} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}, \quad (2)$$

$$W_f(a, b) = \frac{1}{a} \int_{z_b}^{z_1} X_{RCS}(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz', \quad (3)$$

式中： h 为 Haar 函数； b 为 Haar 函数的中心位置； a 为 Haar 函数的尺度大小； W_f 为信号通过协方差变换后得到的新廓线； z_b 和 z_t 分别表示处理高度的上限和下限位置。 W_f 取得最大值的位置为边界层的高度。图 1 给出了理论模拟利用小波协方差变换法识别边界层高度的示意图。图 1(a) 为边界层以上无散射层的距离校正模拟信号，图 1(c) 为边界层以上存在一层散射层的距离校正模拟信号。图 1(b) 和图 1(d) 分别为与之对应的采用不同 Haar 函数尺度的边界层高度反演结果，边界层高度用点表示。无散射层时，随着 Haar 函数尺度的不断扩

大，边界层高度先降低后升高，最后稳定在正确的位置。有散射层存在时，在 Haar 函数尺度选取较小的情况下，识别到了错误的边界层高度，而后随着 Haar 函数尺度的不断扩大，边界层高度重新回到了正确的位置，但与此同时，过大的尺度会损失掉近地面的信号，造成有效搜索范围减小。因此，小波协方差变换法在应对边界层以上出现气溶胶层且大气气溶胶分布复杂情况下边界层高度识别时需要考虑增加 Haar 函数尺度大小，最后确定的 Haar 函数尺度大小与边界层以上出现气溶胶层造成的后向散射回波信号的强弱有关。

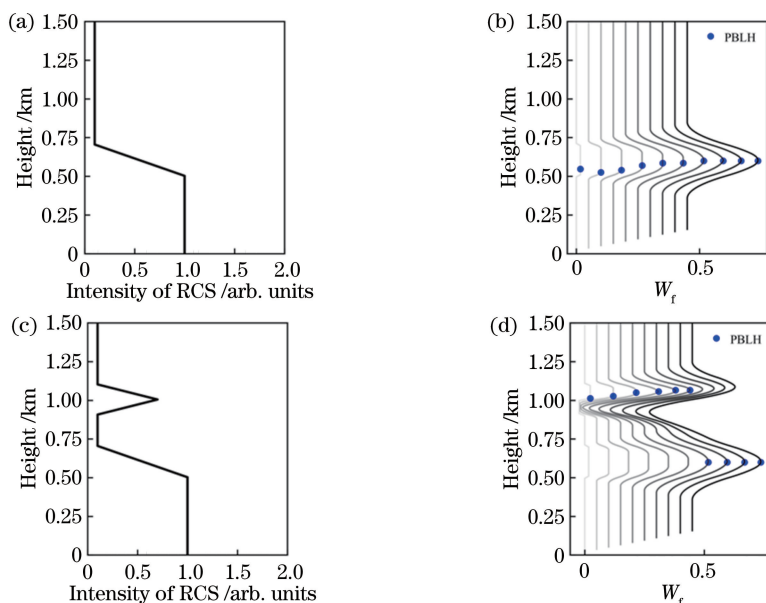


图 1 利用小波协方差变换法从模拟 RCS 中理论识别的边界层高度。(a)(b)边界层以上不存在散射层时的 RCS 强度和对应的边界层高度；(c)(d)边界层以上存在散射层时的 RCS 强度和对应的边界层高度

Fig. 1 Theoretical calculation of PBLH retrieved by WCT from simulated RCS. (a) (b) Simulated RCS intensity and corresponding PBLH profile without a backscatter layer above PBLH; (c) (d) simulated RCS intensity and corresponding PBLH with a backscatter layer above PBLH

3.2 二维矩阵方法识别边界层高度

使用小波协方差变换法识别边界层高度时，边界层高度的反演结果易受到多层气溶胶的影响。为了在多层气溶胶出现复杂大气垂直分布的情况下仍

能够识别到可靠的边界层高度，本研究使用基于二维矩阵的方法来提升边界层高度的识别准确性。该方法的具体计算过程可表示为

$$\mathbf{A}_n(m, n) = \begin{bmatrix} -m^{-2n} & \cdots & -m^{-(n+1)} & m^{-n} & m^{-(n+1)} & \cdots & m^{-2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -m^{-(n+1)} & \cdots & -m^{-2} & m^{-1} & m^{-2} & \cdots & m^{-(n+1)} \\ -m^{-n} & \cdots & -m^{-1} & m^0 & m^{-1} & \cdots & m^{-n} \\ -m^{-(n+1)} & \cdots & -m^{-2} & -m^{-1} & m^{-2} & \cdots & m^{-(n+1)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -m^{-2n} & \cdots & -m^{-(n+1)} & -m^{-n} & m^{-(n+1)} & \cdots & m^{-2n} \end{bmatrix}_{(2n+1) \times (2n+1)}, n \geq 1 \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{Q}_n(t, z, n) = \\
 & \begin{bmatrix} G_{t-n\Delta t}(z+n\Delta z) & \cdots & G_{t-\Delta t}(z+n\Delta z) & G_t(z+n\Delta z) & G_{t+\Delta t}(z+n\Delta z) & \cdots & G_{t+n\Delta t}(z+n\Delta z) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ G_{t-n\Delta t}(z+\Delta z) & \cdots & G_{t-\Delta t}(z+\Delta z) & G_t(z+\Delta z) & G_{t+\Delta t}(z+\Delta z) & \cdots & G_{t+n\Delta t}(z+\Delta z) \\ G_{t-n\Delta t}(z) & \cdots & G_{t-\Delta t}(z) & G_t(z) & G_{t+\Delta t}(z) & \cdots & G_{t+n\Delta t}(z) \\ G_{t-n\Delta t}(z-\Delta z) & \cdots & G_{t-\Delta t}(z-\Delta z) & G_t(z-\Delta z) & G_{t+\Delta t}(z-\Delta z) & \cdots & G_{t+n\Delta t}(z-\Delta z) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ G_{t-n\Delta t}(z-n\Delta z) & \cdots & G_{t-\Delta t}(z-n\Delta z) & G_t(z-n\Delta z) & G_{t+\Delta t}(z-n\Delta z) & \cdots & G_{t+n\Delta t}(z-n\Delta z) \end{bmatrix}_{(2n+1) \times (2n+1)}, \\
 & n \geq 1 \tag{5}
 \end{aligned}$$

$$M(z) = \sum [\mathbf{Q}_n(t, z) * \mathbf{A}_n], \tag{6}$$

式中, $(2n+1)$ 为二维矩阵的尺度大小, m 为权重大小 ($m > 1$), $G_t(z)$ 为距离校正信号在时间为 t 、距离为 z 处的梯度大小, Δt 和 Δz 分别为数据采集的时间分辨率和距离分辨率。

确定矩阵的维度大小和矩阵中元素权重后, 可以得到二维矩阵 \mathbf{A}_n 。以 $G_t(z)$ 为中心, 向四周扩展, 选取 $(2n+1) \times (2n+1)$ 大小的矩阵组成 \mathbf{Q}_n 。通过(6)式计算得到新的廓线 $M(z)$, 当 $M(z)$ 达到最小值时的高度位置定义为边界层高度。这种矩阵结合梯度对边界层高度进行反演的的方法, 称为矩阵优化法(2-D matrix method)。矩阵优化法不仅考虑了垂直方向的距离优化, 还考虑了水平尺度的时间优化, 通过二维尺度搜索距离校正信号的突变位置, 获取边界层高度的识别结果。

4 实验结果

选取两个时间段的 DMPRL 观测数据, 同时使

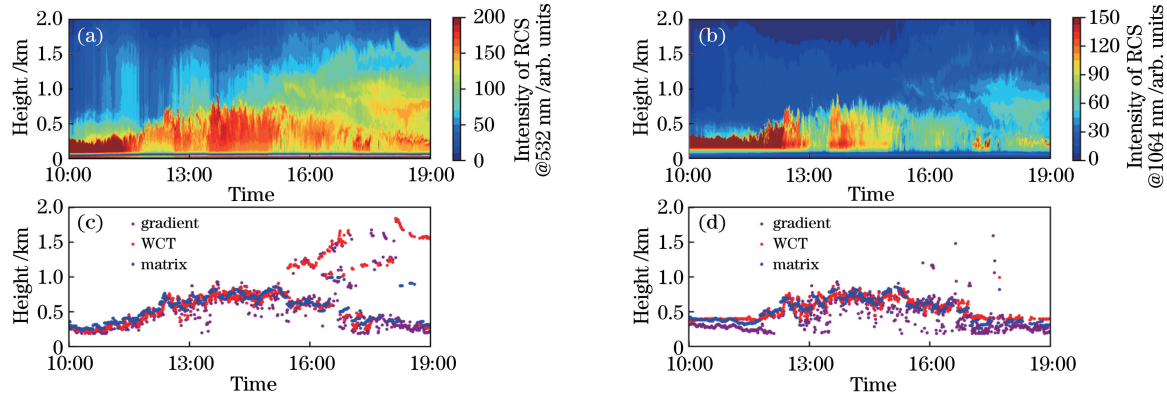


图 2 对 DMPRL 在 2013 年 7 月 1 日 10:00—19:00 的 532 nm 和 1064 nm 两通道 RCS 分别通过梯度法、小波协方差变换法和二维矩阵方法反演的边界层高度。(a) 532 nm 波长 RCS 强度;(b) 1064 nm 波长 RCS 强度;(c) 532 nm 波长的边界层高度;(d) 1064 nm 波长的边界层高度

Fig. 2 PBLH retrieved by gradient, WCT and 2D matrix methods from RCS at 532 nm wavelength and 1064 nm wavelength of DMPRL during 10:00 to 19:00 on July 1, 2013. (a) Intensity of RCS at 532 nm wavelength; (b) intensity of RCS at 1064 nm wavelength; (c) PBLH at 532 nm wavelength; (d) PBLH at 1064 nm wavelength

用小波协方差变换法和二维矩阵方法对选取的数据进行边界层高度识别。选取的时间分别为 2013 年 7 月 1 日 10:00—19:00 和 2013 年 8 月 13 日 6:00—12:00。DMPRL 可以同时获得 532 nm 和 1064 nm 波长两个通道的大气回波信号, 因此可以同时反演两个波长的边界层高度。梯度法的识别结果也一并给出, 以作参考。其中, 二维矩阵方法采用 232.5 m 和 15 min 的二维尺度大小, 小波协方差变换法中 Haar 函数分别采用 300 m (532 nm) 和 100 m (1064 nm) 的尺度大小来对边界层高度进行识别。

图 2 为 2013 年 7 月 1 日 10:00—19:00 时间段 532 nm 和 1064 nm 通道的边界层高度反演结果。图 2(a) 为 532 nm 波长距离校正信号强度, 图 2(b) 为 1064 nm 波长距离校正信号强度。从图 2(c) 的识别结果中可以看出, 10:00—15:00 时间段三种方法有很好的 consistency, 这段时间位于边界层顶部的信号突变明显, 并且在边界层以上无明显的散射层出

现。在 15:00 以后,回波信号出现了多层结构,说明大气垂直分布变得复杂,出现了分层现象。根据上面的讨论,可知此情况会增加小波协方差变换法识别边界层高度的不确定性,故图 2(c)中 15:00 以后由小波协方差变换法和二维矩阵方法识别的边界层高度出现了差异,且小波协方差变换法识别到的边界层高度明显高于二维矩阵方法。然而在图 2(d)的识别结果中,整个时间段内由小波协方差变换法和二维矩阵方法识别的边界层高度都没有出现较大的差异。图 3 为 2013 年 8 月 13 日 6:00—12:00 时间段 532 nm 和 1064 nm 通道的边界层高度反演结果,图中可以看到,三种方法在 532 nm 和 1064 nm 通道的边界层高度反演结果中均有很好的 consistency。

在图 2(d)和图 3(d)中,梯度法、小波协方差变换法和二维矩阵方法对 1064 nm 通道的边界层高

度反演结果具有非常相近的结果,在图 2(c)的 10:00—15:00 时间段和图 3(c)中,3 种方法对 532 nm 通道的边界层高度反演结果具有非常相近的结果,较高的相似性说明边界层高度的反演结果较可靠。以 15 min 为一个时间单位,在图 4 给出了 2013 年 7 月 1 日 (Case 1) 和 2013 年 8 月 13 日 (Case 2) 沿 532 nm 和 1064 nm 两通道通过小波协方差变换法和二维矩阵方法反演得到边界层高度的相关性,图中误差棒表示标准差。从图 4 中可以看出,两种方法在 1064 nm 波长反演结果的相关性要明显优于在 532 nm 波长。从图 4(b)可以看出, Case 1 由小波协方差变换法识别的边界层高度高于二维矩阵方法的识别结果,这表明大气回波信号中边界层以上出现气溶胶散射层会导致小波协方差变换法出现误判的情况。

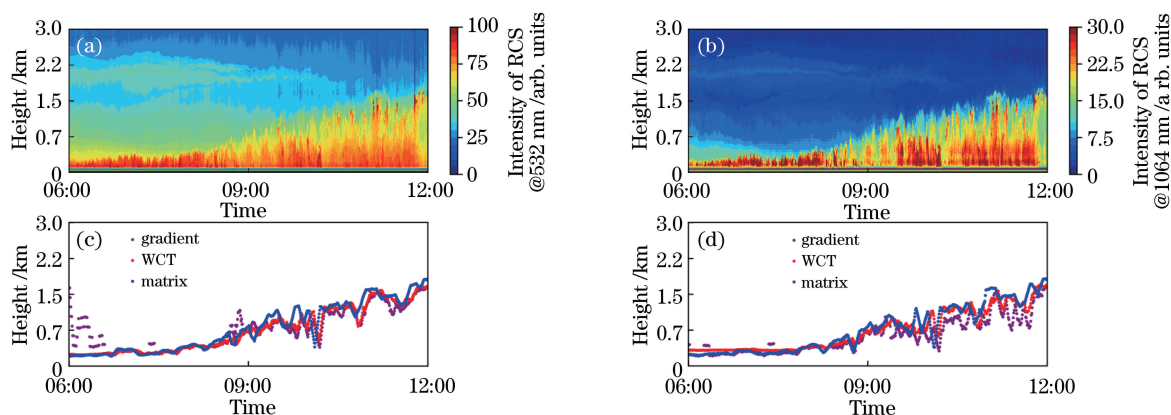


图 3 对 DMPRL 在 2013 年 8 月 13 日 6:00—12:00 的 532 nm 和 1064 nm 两通道数据分别通过梯度法、小波协方差变换法和二维矩阵方法反演的边界层高度。(a) 532 nm 波长 RCS 强度;(b) 1064 nm 波长 RCS 强度;(c) 532 nm 波长的边界层高度;(d) 1064 nm 波长的边界层高度

Fig. 3 PBLH retrieved by gradient, WCT and 2D matrix methods from RCS at 532 nm wavelength and 1064 nm wavelength of DMPRL during 6:00 to 12:00 on August 13, 2013. (a) Intensity of RCS at 532 nm wavelength; (b) intensity of RCS at 1064 nm wavelength; (c) PBLH at 532 nm wavelength; (d) PBLH at 1064 nm wavelength

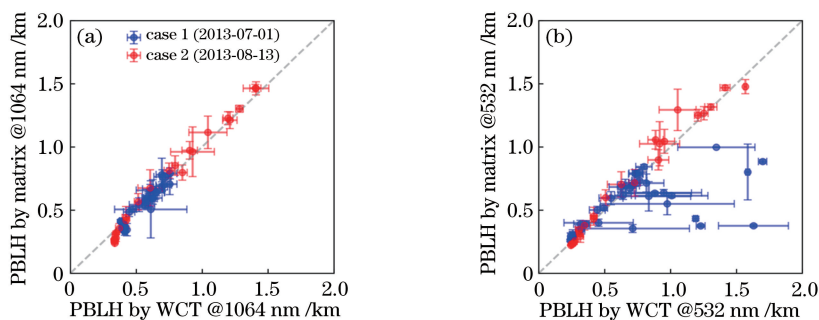


图 4 2013 年 7 月 1 日 (Case 1) 和 2013 年 8 月 13 日 (Case 2) 沿 532 nm 和 1064 nm 两通道通过小波协方差变换法和二维矩阵方法反演得到边界层高度的相关性,平均时间为 15 min,误差棒表示标准差。(a) 1064 nm 通道;(b) 532 nm 通道

Fig. 4 PBLH correlation between WCT and 2-D matrix methods from RCS at 532 nm wavelength and 1064 nm wavelength on July 1, 2013 (Case 1) and on August 13, 2013 (Case 2), in which the average time is 15 min, and the error bar represents the standard deviation. (a) PBLH at 1064 nm wavelength (b) PBLH at 532 nm wavelength

由于在图 4(a)中仍有小部分结果差异较大,因此对 1064 nm 通道的边界层高度结果进行筛选,将小波协方差变换法和二维矩阵方法反演得到边界层高度相差小于 200 m 的结果保留,绘制出图 5,图中 N 为样本数, R 为拟合系数。在图 5 中,以 1064 nm 通道中满足条件的由小波协方差变换法得到的边界层高度作为可靠结果,可以发现 532 nm 通道中由小波协方差变换法和二维矩阵方法得到的反演结果存在差异。小波协方差变换法在 532 nm 通道中反演得到的边界层高度中有部分结果高于 1064 nm 通道中由小波协方差变换法得到的边界层高度。而二维矩阵方法在 532 nm 通道的表现要好很多。经过相关性分析,可得 532 nm 通道中由二维矩阵方法得到的边界层高度与 1064 nm 通道中由小波协方差变换法得到的边界层高度的相关性系数为 0.87,而 532 nm 通道中由小波协方差变换法得到的边界层高度与 1064 nm 通道中由小波协方差变换法得到的边界层高度的相关性系数仅为 0.37。相关系数的变化表明二维矩阵方法提高了 532 nm 通道反演边界层高度的可靠性,在 532 nm 通道中,二维矩阵方法相比小波协方差变换法,在多层气溶胶出现复杂大气垂直分布的情况下,能够更好地反演边界层高度,减少误判情况的发生。

边界层的演变发展具有日变化特征,图 6 给出了 2013 年 7 月 1 日和 2013 年 8 月 13 日的边界层高度逐小时平均变化情况,同时也给出了地面温度

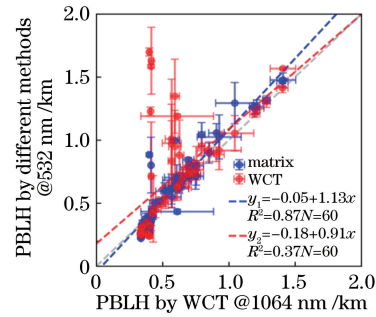


图 5 532 nm 和 1064 nm 两通道反演边界层高度的相关性

Fig. 5 PBLH correlation between 532 nm wavelength and 1064 nm wavelength

随时间的变化。其中 532 nm 波长的边界层高度是二维矩阵方法反演的结果,1064 nm 波长的边界层高度是小波协方差变换法反演的结果。从图 6 可以看到,经过二维矩阵方法识别的 532 nm 通道边界层高度与小波协方差变换法识别的 1064 nm 通道的边界层高度相近。在图 6(a)中,边界层先升高再降低,在 14:00 左右达到最高值,温度的变化也有类似的特征,在 10:00—12:00 温度升高较快,12:00—15:00 缓慢升高,16:00 以后开始下降,温度最高值位于 16:00。边界层高度最高值与温度最高值不在同一时刻主要是由于边界层的演变受到多种因素的影响。在图 6(b)中,在 6:00—11:00 温度升高的同时,边界层高度也在不断升高,这表明边界层在迅速发展。边界层高度和温度具有一致的变化趋势。

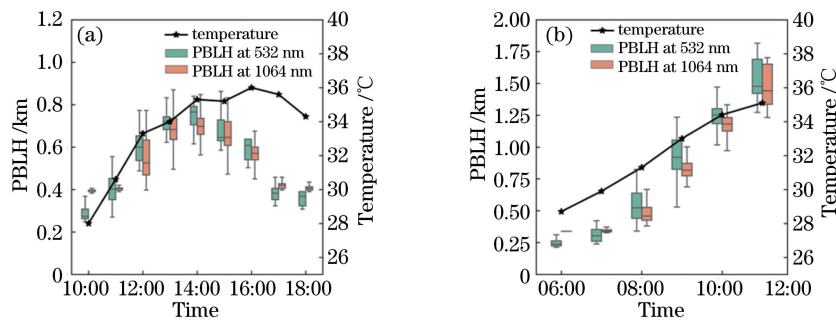


图 6 532 nm 和 1064 nm 两通道反演的边界层高度和地面温度随时间的变化。

(a) 2013 年 7 月 1 日 10:00—18:00; (b) 2013 年 8 月 13 日 6:00—11:00

Fig. 6 PBLH retrieved from RCS at 532 nm wavelength and 1064 nm wavelength and surface temperature versus time in two cases. (a) 10:00 to 18:00 on July 1, 2013; (b) 6:00 to 11:00 on August 13, 2013

5 结 论

激光雷达具有高的时间、空间分辨率,能够对大气进行全天候连续垂直探测。激光雷达以气溶胶为示踪物,通过识别大气回波信号中的信号突变位置

来确定边界层高度,是连续监测大气边界层高度变化的有效工具。本研究理论模拟了小波协方差变换法在大气回波信号中存在散射层情况下识别的边界层高度,结果表明 Haar 小波尺度选取对识别结果的影响较大,Haar 小波尺度选取不合理会造成边界

层高度的误判和低层信号的损失,故该方法应用于边界层以上出现气溶胶散射层信号的情况时存在不足。为此,提出考虑时间和距离的二维矩阵方法,并将其应用于这种复杂情况下大气边界层高度的识别。选取浙江金华实验两个时间段的连续观测数据进行分析,对其 532 nm 和 1064 nm 波长的距离校正信号采用梯度法、小波协方差变化法和二维矩阵方法进行边界层高度的识别,当边界层出现多层气溶胶结构时,边界层高度的识别结果在 532 nm 波长出现差异,且小波协方差变换方法识别的边界层高度要高于二维矩阵方法识别的结果,而在 1064 nm 波长,两种方法的识别结果一致。将 1064 nm 波长的小波协方差变换法的识别结果作为可靠的边界层高度(1064 nm 波长下使用小波协方差变换法和使用二维矩阵方法获得的识别结果相差不超过 200 m 情况下),发现在 532 nm 波长使用小波协方差变换法的识别结果和可靠结果的相关性与 532 nm 波长使用二维矩阵方法获得的识别结果和可靠结果的相关性从 0.37 提高到 0.87。最后给出了 532 nm 波长(二维矩阵方法)和 1064 nm 波长(小波协方差矩阵方法)的边界层高度与地面温度随时间的变化,一致的变化趋势说明此结果是可靠的。

二维矩阵方法从时间、距离二维尺度上识别信号中的边界层高度,有助于改善在 532 nm 波长大气回波信号中存在多层气溶胶结构情况下边界层高度的识别结果,为进一步改善无云情况下(3 km 以内无云层出现)激光雷达自动连续识别边界层高度提供了优化的反演方法。在污染条件下,气溶胶垂直分布具有多种来源,夜间会出现夹卷层和残留层,故多层气溶胶结构较易出现。二维矩阵方法可以很好地改善 532 nm 激光雷达在上述情况下对边界层高度的自动连续反演能力,边界层高度的可靠识别对于研究气溶胶的传输、气溶胶的来源和夜间边界层的探测提供了重要的边界层参数信息。

参 考 文 献

- [1] Sheng P X, Mao J T, Li J G. Atmospheric physics [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2013: 239-240.
盛裴轩,毛节奏,李建国. 大气物理学[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2013: 239-240.
- [2] Emeis S, Schäfer K, Münkel C. Surface-based remote sensing of the mixing-layer height a review [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2008, 17(5): 621-630.

- [3] Mao M J, Jiang W M, Gu J Q, et al. Study on the mixed layer, entrainment zone, and cloud feedback based on lidar exploration of Nanjing City [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(4): L04808.
- [4] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988: 545-585.
- [5] Zhuang Q F, Wang Y M, Wang Z J, et al. Typical case of multi-wavelength aerosol lidar observation of persistent hazy weather in Beijing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 240101.
庄全风,王一萌,王章军,等. 多波长气溶胶激光雷达观测北京地区持续性雾霾的典型案例[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240101.
- [6] Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0710003.
徐俊杰,卜令兵,刘继桥,等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0710003.
- [7] Fang X, Wang M, Hu S X. Distribution characteristics of atmospheric pollutions in Meiyu season observed by lidar over Hefei [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0110003.
方欣,王敏,胡顺星. 合肥梅雨季节大气污染物分布特征的激光雷达探测[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0110003.
- [8] Liu S Y, Liang X Z. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height [J]. Journal of Climate, 2010, 23(21): 5790-5809.
- [9] Yan B D, Song X Q, Chen C, et al. Beijing atmospheric boundary layer observation with lidar in 2011 spring[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s128001.
闫宝东,宋小全,陈超,等. 2011 春季北京大气边界层的激光雷达观测研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s128001.
- [10] Zhang W, Wu S H, Song X Q, et al. Atmospheric boundary layer detected by a Fraunhofer lidar over Qingdao suburb [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0628002.
张薇,吴松华,宋小全,等. 夫琅禾费暗线激光雷达探测青岛市郊大气边界层[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0628002.
- [11] Wang D X, Song X Q, Feng C Z, et al. Coherent Doppler lidar observations of marine atmospheric boundary layer height in the Bohai and Yellow Sea [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s101001.
王东祥,宋小全,冯长中,等. 相干多普勒激光雷达

- 观测渤海海洋大气边界层高度研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s101001.
- [12] Xiang Y, Zhang T S, Liu J G, et al. Evaluation of boundary layer height simulated by WRF mode based on lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0110002.
项衍, 张天舒, 刘建国, 等. 基于激光雷达对 WRF 模式模拟边界层高度的评估[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0110002.
- [13] Endlich R M, Ludwig F L, Uthe E E. An automatic method for determining the mixing depth from lidar observations[J]. Atmospheric Environment, 1979, 13(7): 1051-1056.
- [14] Wang Z Z, Li J, Zhong Z Q, et al. LIDAR exploration of atmospheric boundary layer over downtown of Beijing in summer [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 96-100.
王珍珠, 李炬, 钟志庆, 等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 96-100.
- [15] Brooks I M. Finding boundary layer top: application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(8): 1092-1105.
- [16] Lewis J R, Welton E J, Molod A, et al. Improved boundary layer depth retrievals from MPLNET [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(17): 9870-9879.
- [17] Melfi S H, Spinhirne J D, Chou S H, et al. Lidar observations of vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1985, 24(8): 806-821.
- [18] Campbell J R, Sassen K, Welton E J. Elevated cloud and aerosol layer retrievals from micropulse lidar signal profiles [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(5): 685-700.
- [19] Bravoaranda J A, Moreira G D A, Navasguzman F, et al. A new methodology for PBL height estimations based on lidar depolarization measurements: analysis and comparison against MWR and WRF model-based results [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(11): 6839-6851.
- [20] Teng J Y, Qin K, Wang Y J, et al. Study on automatic identification of aerosols boundary layer height with local optimum model based on lidar data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(2): 361-367.
滕继晓, 秦凯, 汪云甲, 等. 基于激光雷达观测的大气边界层自动识别局部最优点算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(2): 361-367.
- [21] Mao F Y, Gong W, Song S L, et al. Determination of the boundary layer top from lidar backscatter profiles using a Haar wavelet method over Wuhan, China [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49: 343-349.
- [22] Yu S Q, Liu D, Xu J W, et al. Aerosol multi-layer vertical distribution detected by lidar [J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(6): 30-34.
于思琪, 刘东, 徐继伟, 等. 大气气溶胶多层结构的激光雷达探测[J]. 装备环境工程, 2019, 16(6): 30-34.
- [23] Wang Z Z, Liu D, Wang Y J, et al. Development of dual-wavelength Mie polarization Raman lidar for aerosol and cloud vertical structure probing [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9299: 929916.
- [24] Xiang C L, Wang Y J, Zhou H Z, et al. Development of the anthropogenic air pollutants emission inventory in Jinhua [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(S2): 229-237.
项成龙, 王杨君, 周怀中, 等. 金华市人为源大气污染物排放清单[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S2): 229-237.
- [25] Zhang W C, Augustin M, Zhang Y, et al. Spatial and temporal variability of aerosol vertical distribution based on lidar observations: a haze case study over Jinhua basin [J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015: 447-466.