

# 相干多普勒激光雷达观测渤海 海洋大气边界层高度研究

王东祥 宋小全 冯长中 王希涛 吴松华

中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100

**摘要** 2014 年 4 月 27 日至 2014 年 5 月 19 日在“国家自然科学基金委 2014 年渤海共享航次春季航次”中, 中国海洋大学利用自行研制的相干多普勒激光雷达在渤海 32°N~40°N, 118.5°E~125.3°E 区域内观测海上大气边界层结构。相干多普勒激光雷达垂直指向发射激光和接收回波时, 利用不同高度距离库内快速傅里叶变换谱的峰值计算了信号的信噪比, 基于梯度法从信噪比廓线数据反演和提取大气边界层高度。该结果与同步的探空仪数据、Vaisala 商业化的 CL31 型云高仪边界层高度进行对比, 相干多普勒激光雷达结果与探空仪位温数据提取结果的相关性为 79%, 标准差为 610 m; 相干多普勒激光雷达与探空仪相对湿度数据提取结果的相关性为 90%, 标准差为 370 m; 相干多普勒激光雷达与云高仪获取结果的相关性为 94%, 标准差为 320 m。

**关键词** 遥感; 相干多普勒激光雷达; 大气边界层高度; 探空仪; 信噪比

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.s101001

## Coherent Doppler Lidar Observations of Marine Atmospheric Boundary Layer Height in the Bohai and Yellow Sea

Wang Dongxiang Song Xiaoquan Feng Changzhong Wang Xitao Wu Songhua

College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

**Abstract** During the National Natural Science Foundation of China open cruise of the R/V Dongfanghong-2 (NSFC 41349901), coherent Doppler lidar developed by Ocean University of China is used to observe atmospheric boundary layer structure in the Bohai and Yellow Sea. Lidar measurement is operated in the region between 32°N~40°N and 118.5°E~125.3°E, from April 27 to May 19, 2014. Lidar transmits the laser pulse to the atmosphere and receives its backscattering echo signals. Signal to noise ratio is calculated for each range bin of fast Fourier transform spectrum. The marine atmospheric boundary layer height is retrieved according to the minimum of gradient of signal to noise ratio profile. Comparisons between coherent Doppler lidar retrieval and synchronous radiosonde profiling, Vaisala CL31 laser ceilometer data show a good agreement between each other. Correlation of lidar results with radiosonde potential temperature data is 79% with a standard deviation of 610 m. Correlation of lidar and radiosonde relative humidity data is 90% with a standard deviation of 370 m. And the correlation of lidar and ceilometer data is 94% with a standard deviation of 320 m.

**Key words** remote sensing; coherent Doppler lidar; atmospheric boundary layer height; radiosonde; signal to noise ratio

**OCIS codes** 010.3640; 010.0280; 010.1310; 010.1350

## 1 引 言

海洋大气边界层(MABL)是海气界面和自由大气的重要连接部分, 动量、热量和水汽含量通过 MABL 影响大气循环。估计这些变量的垂直通量, 必须了解 MABL 的结构特征, 其对研究海洋上空的温湿通量、垂

**收稿日期:** 2015-01-14; **收到修改稿日期:** 2015-03-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(41375016, 41471309)、国家 863 计划(2014AA09A511)

**作者简介:** 王东祥(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: wdx0000002008@163.com

**导师简介:** 宋小全(1976-), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光遥感遥测方面的研究。E-mail: songxq@ouc.edu.cn(通信联系人)

直对流,以及污染输运有着重要作用<sup>[1-2]</sup>。海气边界层包括海表层、混合层和卷挟层,其中最重要的是混合层,如果不考虑贴近海表层的剪切力,混合层主要由热湍流作用形成,热湍流形成的混合层比较均匀,可以达到边界层顶部,通常又称对流边界层(CBL)<sup>[3]</sup>。由于气溶胶粒子主要来源于地球表面,使 MABL 中气溶胶的含量高于自由大气中气溶胶的含量。

气溶胶是由固体或液体小质点分散并悬浮在气体介质中形成的胶体分散体系,其大小为  $0.001\sim 100\ \mu\text{m}$ ,是相干多普勒激光雷达发射激光产生有效散射的主要示踪物质。气溶胶主要分布于对流层大气,并富集于大气边界层当中,通常在大气边界层顶与自由大气交界处伴随着气溶胶浓度的快速变化。中国海洋大学自行研制的相干多普勒激光雷达系统激光发射波长为  $1.5\ \mu\text{m}$ ,气溶胶粒子的直径接近或大于激光波长,所以可用 Mie 散射来描述其散射特性。多普勒激光雷达接收到的信号强度和信号噪声比变化与气溶胶分布浓度正相关,因此 MABL 的高度可以根据信噪比变化来推测。

探测边界层的手段有卫星、微波雷达、探空气球、激光雷达<sup>[4-5]</sup>。激光雷达可以测量到较强的 MABL 气溶胶后向散射信号以及气溶胶后向散射的梯度变化,因而成为国际公认的监测 MABL 的崭新技术手段<sup>[6-7]</sup>。目前利用激光雷达回波信号反演边界层高度有三种主流的方法,包括对每条回波廓线设置阈值,通过阈值将信号中的噪声滤除,从而得到真实边界层高度信息<sup>[8]</sup>;利用小波分析方法寻找回波信号积分的最大值,该最大值对应的高度就是边界层高度<sup>[9-10]</sup>;求出回波信号的垂直梯度,将梯度负值的最小值所在高度定义为大气边界层的高度<sup>[11-15]</sup>。本文根据相干多普勒激光雷达测量所得的频谱数据的信噪比,结合垂直梯度法,利用信噪比梯度法求出海上边界层高度,通过探空仪和 Vaisala 云高仪验证了该方法的可行性,为激光雷达提取海洋边界层高度提供了新的方法和思路。

## 2 观测系统及基本原理

### 2.1 相干多普勒激光雷达

相干多普勒激光雷达系统分为发射系统,接收系统和数据采集与处理系统,系统原理如图 1 所示,图中 ISO 为隔离器,AOM 为声光调制器,A/D 为模数变换,FFT 表示快速傅里叶变换,参数如表 1 所示。

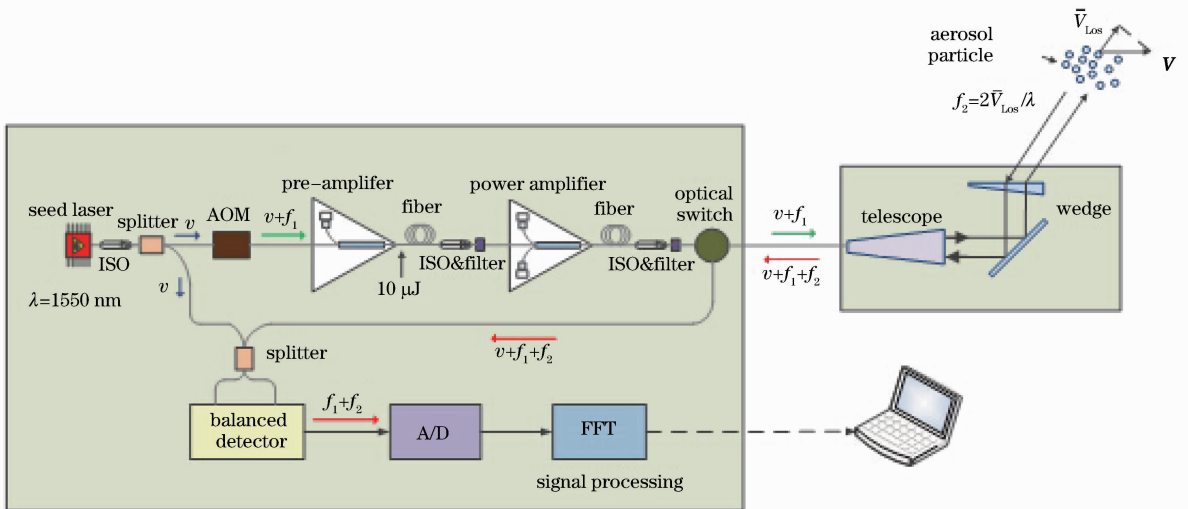


图 1 相干多普勒激光雷达系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of coherent Doppler lidar system

相干多普勒激光雷达发射红外波段的脉冲激光到大气中,尘粒和悬浮粒子等大气气溶胶粒子会对激光产生散射回波。由于多普勒效应,散射的激光回波频率相对于发射激光频率会产生一个与气溶胶粒子速度相关的频移,回波光信号经接收光学系统收集,会聚到信号光探测器光敏面,并与本振光混频,探测器响应二者差频,并输出载频为脉冲信号。对回波探测器差频的输出与发射激光频移进行比较,即可推算出测量点大气气溶胶粒子相对于系统的径向运动速度<sup>[16]</sup>。通过设置距离库,激光束以一定指向进行多角度或扫描测量,最终获得空间不同距离处各扫描样本点的径向速度数据。对在全部扫描过程中获取的径向风速、激光束

指向角度和距离数据进行矢量处理,可以得到风场和气溶胶信息。

表 1 相干多普勒激光雷达系统的参数指标

Table 1 Parameters and specifications of coherent Doppler lidar

Parameters	Specifications	Parameters	Specifications
Wavelength / $\mu\text{m}$	1.5	Spatial resolution /m	30
Repetition rate /kHz	10	Scanner pointing accuracy /( $^\circ$ )	0.1
Pulse energy / $\mu\text{J}$	100	Speed measurement uncertainty /(m/s)	$\leq 0.1$
Measurement range /m	30~3000	Scan speed /[( $^\circ$ )/s]	1~55

## 2.2 相干多普勒激光雷达信噪比廓线

激光雷达方程可计算接收从距离激光器  $R$  处激光束的大气后向散射信号功率,能够进入探测器的信号功率表示为

$$P_s = \frac{\eta A_{\text{area}} \beta T^2}{2R^2} c E_r, \quad (1)$$

式中  $P_s$  表示信号回波功率,  $\eta$  表示系统的整体效率,  $\beta$  表示气溶胶的后向散射系数,  $T$  表示大气光学透射率,  $R$  为探测距离,  $c$  为光速,  $E_r$  是激光脉冲能量,  $A_{\text{area}}$  是有效接收面积<sup>[17]</sup>。

信噪比(SNR)是反映系统探测能力的重要指标,相干多普勒激光雷达是利用本振光功率放大信号光,从而提高 SNR<sup>[16]</sup>,系统的 SNR 可表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{\eta \beta T^2 c E_r}{h \nu B 2 R^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \left[ 1 + \left( \frac{\pi A_c^2 D^2}{4 \lambda R} \right)^2 \left( 1 - \frac{R}{F} \right)^2 + \frac{A_c^2 D^2}{2 \rho_0^2} \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中  $h$  为普朗克常量,  $\nu$  为激光频率,  $B$  为探测器带宽,  $D$  为发射激光高斯光束直径,  $A_c$  为效率因子,  $F$  为系统光学焦距,  $\rho_0$  为湍流因子。

大气边界层被认为是低层大气与地表湍流传输的过渡部分<sup>[3]</sup>,大气边界层以内的气溶胶分布浓度明显高于边界层之上自由大气部分的气溶胶浓度。本系统发射波长为  $1.5 \mu\text{m}$  的红外波,激光遇到气溶胶后发生散射,气溶胶的浓度越大,仪器接收到的后向散射信号也就越强。激光雷达信号会在边界层内发生强烈的散射,通过过渡区域时信号逐渐减弱,进入自由大气层时信号强度减小趋势变的平稳<sup>[18]</sup>。本文利用相干多普勒激光雷达测得的不同高度距离库内 FFT 频谱信号[图 2(a)所示]的峰值来计算信号的 SNR,其信噪比廓线上的变化情况可直观反映气溶胶浓度廓线。自由大气中气溶胶的浓度通常比对流边界层中的气溶胶的浓度要少,因此随着高度的增加,SNR 会在边界层顶高度快速减小,表示该高度气溶胶的浓度突然变少,如图 2(b)红色矩形所在的区域<sup>[19-20]</sup>。

2014 年 4 月 27 日至 2014 年 5 月 19 日,中国海洋大学利用自行研制的相干多普勒激光雷达执行“国家自然科学基金委 2014 年渤海黄共享航次春季航次”,在渤海黄  $32^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$ ,  $118.5^\circ\text{E} \sim 125.3^\circ\text{E}$  区域内观测

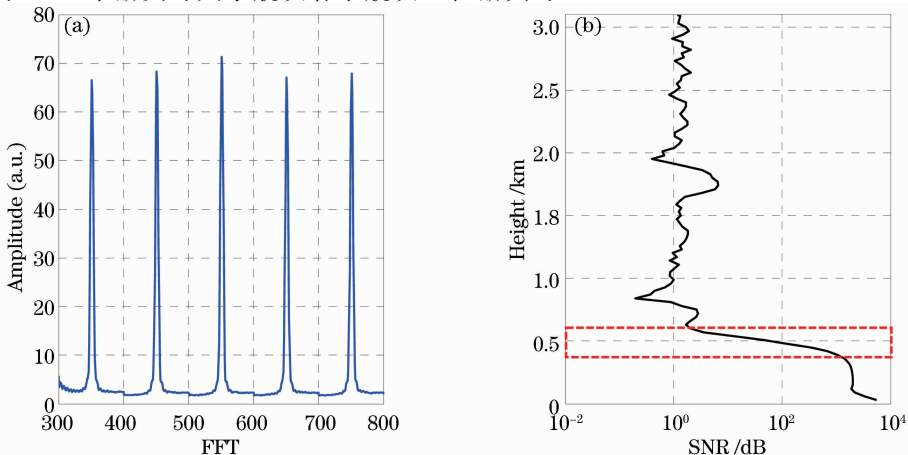


图 2 2014 年 5 月 3 日 07:00~07:10 激光雷达回波信号。(a)频谱数据廓线;(b)信噪比廓线

Fig. 2 Lidar echo signal at 07:00~07:10 on May 3, 2014. (a) FFT spectral data profile; (b) SNR profile

海上大气边界层结构。图 3 是 5 月 14 日利用上述方法观测到的相干多普勒激光雷达信噪比廓线绘制的时间高度指示 (THI) 图, 显示出北京时间 07:33~19:43 大气气溶胶在大气边界层内随高度的变化情况, 可以看出自上午到午后大气边界层高度逐渐升高、下午至傍晚逐渐降低等变化细节, 同时还观测到 07:33 之后大约 0.5 h 内在 2.5 km 处存在着的云层信息。

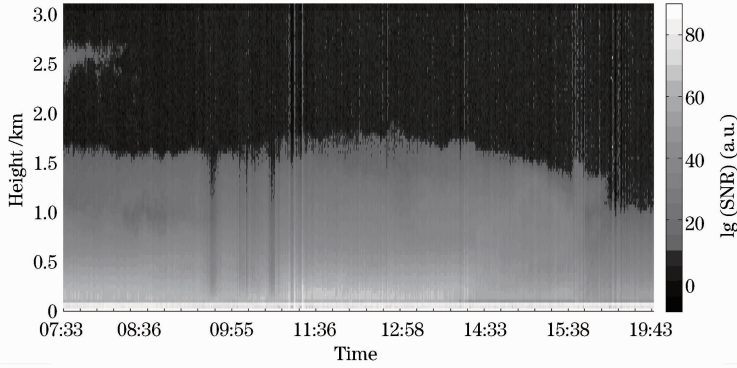


图 3 5 月 14 日 07:33~19:43 信噪比变化情况 THI 图

Fig. 3 THI result of SNR variation at 07:33~19:43 on May 14, 2014

### 2.3 边界层高度反演方法

激光雷达回波信号在边界层内的变化情况不同于在自由大气中的变化情况, 可以通过计算激光雷达回波信号经过距离平方校正后的梯度来获取大气边界层的高度信息。为了进一步减少采样等对信噪比廓线造成的影响, 首先对 SNR 进行 3 点距离平滑, 然后求其距离平方校正信号  $S_{RC}$ , 对  $S_{RC}$  取对数后求导, 其一阶导数的负值的最小值就是边界层高度, 公式为

$$h_{ABL} = \min \left\{ \frac{d\{\lg[S_{RC}(R)]\}}{dR} \right\}. \quad (3)$$

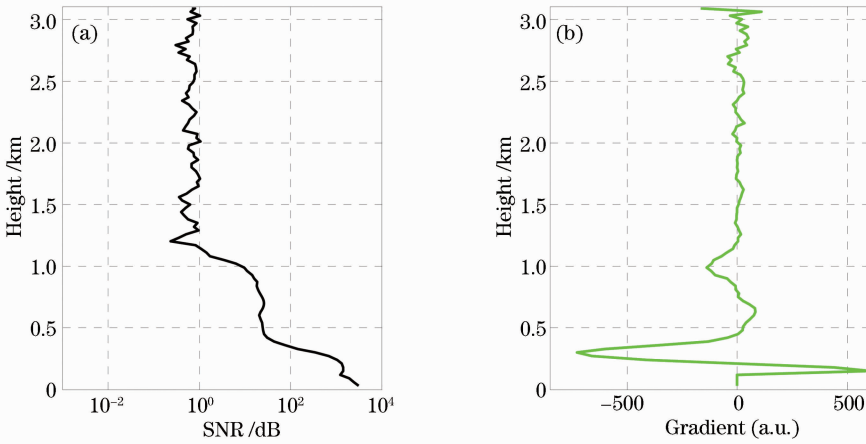


图 4 激光雷达回波数据反演廓线。(a)信噪比;(b)垂直梯度廓线

Fig. 4 Inversion profile of lidar echo data. (a) SNR; (b) vertical gradient profile

## 3 探空仪和 Vaisala 云高仪验证与对比分析

### 3.1 探空仪探测边界层高度

实验期间根据观测需要施放全球定位系统 (GPS) 探空仪, 可测得温度、风速、风向、湿度、气压、露点等气象要素廓线。根据探空仪获取的位温, 即空气在干绝热条件下变化到标准大气压时的温度, 计算其垂直梯度并以其最大值所在高度确定为大气边界层的高度<sup>[21-24]</sup>。此外, 亦可利用探空仪的相对湿度廓线数据来获取边界层的高度信息, 通常定义相对湿度梯度的最小值所在位置为边界层高度<sup>[25]</sup>, 图 5 依次给出了 GPS 探空仪所测量和计算得到的位温、位温梯度、相对湿度、相对湿度梯度的廓线样例。

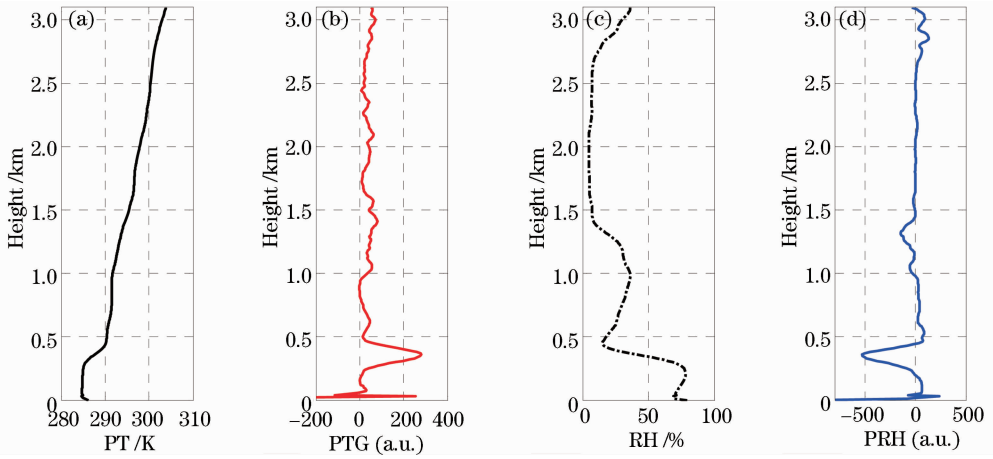


图 5 5月3日 13:45~14:10 时段内的探空仪廓线图。(a) 位温廓线；(b) 位温梯度廓线；(c) 相对湿度廓线；(d) 相对湿度梯度廓线

Fig. 5 Radiosonde profiles at 13:45~14:10 on May 3, 2014. (a) Potential temperature profile; (b) potential temperature gradient profile; (c) relative humidity profile; (d) relative humidity gradient profile

### 3.2 Vaisala 云高仪探测边界层高度

本次实验还携带有 Vaisala 云高仪 CL31 型,其通过发射 910 nm 的红外激光来探测大气中的气溶胶后向散射信息。云高仪同时利用后向散射系数的梯度来计算混合层高度,并且根据大气中不同层的气溶胶浓度的变化来判定边界层的厚度,通过设置阈值将降雨和有云的情况剔除后,最终将其梯度最小值作为边界层高度。通过读取云高仪的 Level\_3 数据可以直接显示边界层高度信息,因此可将这些测量反演结果来验证相干多普勒激光雷达得到的边界层高度的准确性。

## 4 测量结果分析

探空仪的施放通常为北京时间上午 8:00、下午 8:00,并根据实验需要进行加密观测。出海实验全程共采集了 32 组有效探空数据,这些探空数据与相干多普勒激光雷达数据进行对比,涵盖了凌晨、早晨、中午、下午等多个时间段。图 6(a)所示的是 32 组相干多普勒激光雷达和探空仪位温梯度数据获取边界层高度对比结果,两者相关性为 79%,标准差为 0.61 km。对比数据中出现三组相差大于 0.80 km 的情况,据实验记录显示当时天气情况分别为:5月2日 22:53~23:10(绿色椭圆所圈的点)出现海雾和小雨,相干多普勒激光雷达测得的边界层高度是 0.78 km,探空仪位温测得的边界层高度为 2.59 km。根据云高仪 Level\_3 数据显示

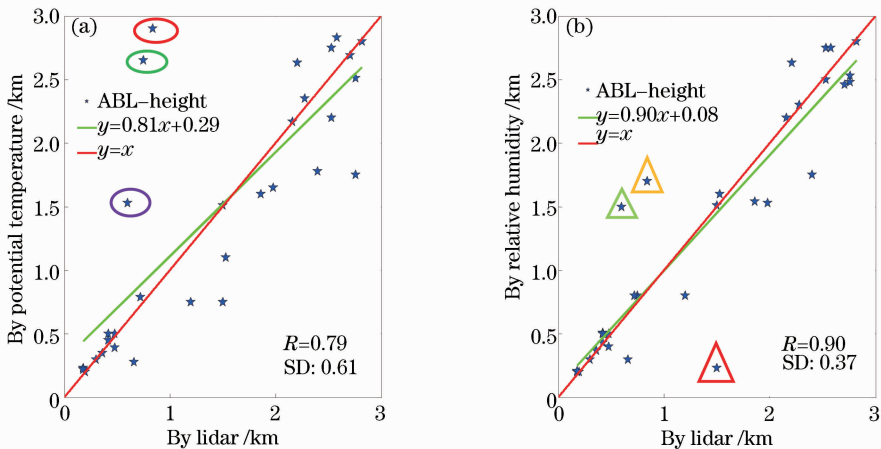


图 6 大气边界层高度对比图。(a)探空仪位温与激光雷达;(b)探空仪相对湿度与激光雷达

Fig. 6 Comparison of atmospheric boundary layer height. (a) Radiosonde potential temperature and lidar; (b) radiosonde relative humidity and lidar

该时刻第一层边界层高度为 0.80 km,与相干多普勒激光雷达测得的边界层高度接近,而探空仪位温梯度测得的边界层高度则是云底的位置所在高度。5月9日 14:00~14:15(紫色椭圆所圈的点)出现碎积云,相干多普勒激光雷达测得的边界层高度是 0.60 km,探空仪位温测得的边界层高度为 1.51 km。根据云高仪 Level\_3 数据显示该时刻第二层边界层高度为 0.58 km,与相干多普勒激光雷达测得的边界层高度接近,而探空仪位温梯度测得的边界层高度则是云底位置所在的高度。5月11日 07:00~07:15(红色椭圆所圈的点)出现大雨,相干多普勒激光雷达测得的边界层高度是 0.84 km,探空仪位温测得的边界层高度为 2.87 km。根据云高仪 Level\_3 数据显示该时刻第一层云云底高度为 0.75 km,第二层云云底高度为 3.10 km,无边界层高度信息。相干多普勒激光雷达测得的边界层高度是第一层云云顶的高度,由于云层较厚且降水较强,相干多普勒激光雷达信号不能完全穿透云层,因此其判定的高度和探空仪位温梯度判定的高度相差 2 km。

图 6(b)为相干多普勒激光雷达和探空仪相对湿度梯度数据对比结果,两者相关性为 90%,标准差(SD)为 0.37 km。出现三个对比值相差大于 0.8 km 的情况,根据实验记录当时天气情况分析,同样由于云层遮挡、大雨时出现对比结果的较大偏差。

云高仪在整个航次中一直处于 24 h 开机观测状态,本文选取与相干多普勒激光雷达观测同时间段内云高仪所测的 Level\_3 边界层高度数据,将这些数据与相干多普勒激光雷达数据进行对比。如图 7 所示相干多普勒激光雷达与云高仪测得的边界层高度信息的相关性为 94%,标准差为 0.32 km。图中出现的三组对比值相差大于 0.8 km 的情况,根据实验记录当时的情况为降雨、海雾和多云,而且云高仪是利用后向散射系数判定边界层高度,相干多普勒激光雷达利用的是信噪比来判定边界层高度,因此相干多普勒激光雷达与云高仪有三组数据对比结果出现较大偏差。

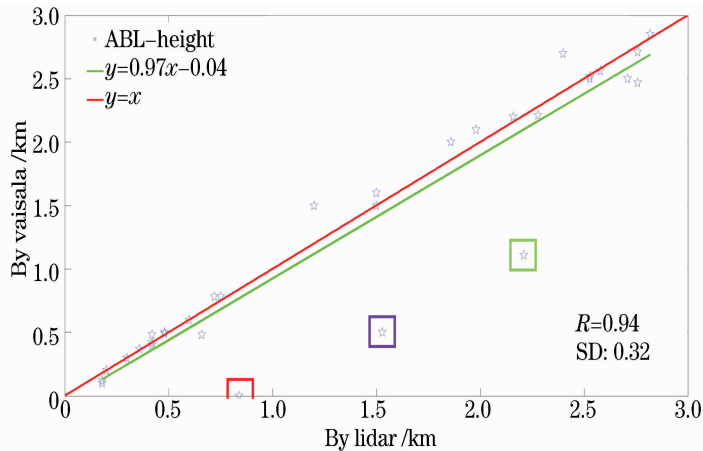


图 7 云高仪边界层高度与激光雷达所得边界层高度对比图

Fig. 7 Comparison of atmospheric boundary layer height derived from ceilometer and lidar

## 5 结 论

相干多普勒激光雷达与探空仪以及云高仪对比实验中共采集 32 组有效对比数据,这些数据中有 28 组数据是在晴天状况下测得,其对比结果表现出良好的一致性。有 4 组数据是在雨天、雾天和有云等情况下获取的,两者对边界层高度的判定会出现大于 0.8 km 的偏差。分析其原因有以下三方面:

1) 当下大雨时,由于雨滴的影响,相干多普勒激光雷达不能像晴天一样很好地对目标物进行探测。出现海雾时,探空仪通常是判定雾顶部的位置为边界层的高度,而相干多普勒激光雷达认为气溶胶浓度骤降的高度位置为边界层高度。当出现云时,相干多普勒激光雷达通常将云顶的位置判定为边界层高度。

2) 由于出海过程中天气变化无常,以及算法等原因,未将云和降雨的影响考虑在内,导致相干多普勒激光雷达和探空仪判定的边界层高度出现大于 0.8 km 的偏差。

3) 同时由于相干多普勒激光雷达、探空仪、云高仪的机理不同,而且在释放探空气球的时候,船处于行驶状态,所以导致相干多普勒激光雷达和探空仪有 4 组数据相差大于 0.8 km,相干多普勒激光雷达和云高仪有三组对比数据相差大于 0.8 km,但结果整体上匹配良好。

**致谢** 感谢张洪玮、廖希伟、秦胜光等出海实验人员;感谢戴光耀、庄全凤提出的宝贵建议;感谢中国海洋大学海洋环境学院的张苏平教授、王媛、钟文秀提供的云高仪数据、探空仪数据及深入的技术讨论。

## 参 考 文 献

- 1 Wan Kai. The Marine atmospheric boundary layer characteristic parameters of satellite SAR images inversion [J]. *Marine Science Development*, 2005, 23(3): 322–327.  
万 凯. 卫星 SAR 图像的海洋大气边界层特征参数的反演[J]. *海洋科学发展*, 2005, 23(3): 322–327.
- 2 K E Kunkel, E W Eloranta, S T Shipley. Lidar observations of the convective boundary layer[J]. *J Appl Meteorol*, 1977, 16(12): 1306–1311.
- 3 R B Stull. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988: 2–16.
- 4 Yuan Lin, Liu Bo, Wang Bangxin, *et al.*. Design of mobile 1064 nm Mie scattering lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(7): 1721–1725.  
袁 林, 刘 博, 王邦新, 等. 车载式 1064 nm 米氏散射激光雷达的研制[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1721–1725.
- 5 Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1014002.  
伯广宇, 刘 东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1014002.
- 6 Tao Zongming, Wu Decheng, Liu Dong, *et al.*. Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1214001.  
陶宗明, 吴德成, 刘 东, 等. 激光雷达反演气溶胶后向散射系数误差估算[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1214001.
- 7 Xie Chenbo, Zhou Jun, Yue Guming, *et al.*. New mobile Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(9): 1281–1286.  
谢晨波, 周 军, 岳古明, 等. 新型车载拉曼激光雷达测量对流层水汽[J]. *光学学报*, 2006, 26(9): 1281–1286.
- 8 S H Melfi, J D Spinhirne, S H Chou, *et al.*. Lidar observations of vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean[J]. *Climate Appl Meteorol*, 1985, 24(8): 806–821.
- 9 K J Davis, D H Lenschow, S P Oncley, *et al.*. Role of entrainment in surface-atmosphere interactions over a boreal forest[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(D24): 29219–29230.
- 10 M Ian Brooks. Finding boundary layer top: application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2003, 20(8): 1092–1105.
- 11 G Martucci, R Matthey, V Mitev, *et al.*. Comparison between backscatter lidar and radiosonde measurements of the diurnal and nocturnal stratification in the lower troposphere[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2007, 24(7): 1231–1244.
- 12 C Flamant, J Pelon, P H Flamant, *et al.*. Lidar determination of the entrainment zone thickness at the top of the unstable marine atmospheric boundary layer[J]. *Boundary Layer Meteorol*, 1997, 83(2): 247–284.
- 13 A B White, C J Senff, R M Bant, *et al.*. A comparison of mixing depths observed by ground-based wind profilers and an airborne lidar[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 1999, 16(5): 584–590.
- 14 B Hennemuth, A Lammert. Determination of the atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter[J]. *Bound Layer Meteorol*, 2005, 120(1): 181–200.
- 15 A Lammert, J Bosenberg. Determination of the convective boundary-layer height with laser remote sensing[J]. *Bound Layer Meteorol*, 2006, 199(1): 159–170.
- 16 S Kameyama, T Ando, K Asaka, *et al.*. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(11): 1953–1962.
- 17 Wang Xitao, Liu Zhishen. The Research of All-Fiber Laser Heterodyne Detection for Velocity Measurement[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011: 38–43.  
王希涛, 刘智深. 全光纤激光相干测速技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 38–43.
- 18 Y Bhavani Kumar, S Purusotham. Mathematical algorithms for determination of mixed layer height from laser radar signals [J]. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2010, 2(6): 2059–2063.
- 19 J P Cariou, L Sauvage, S Lolli, *et al.*. Planetary boundary layer dynamic measurements with new compact long range wind Lidar Windcube™ WLS70[C]. Fourth Symposium on Lidar Atmospheric Applications, 89th American Meteorological Society Annual Meeting, 2009.
- 20 Y Sasano, H Shimizu, N Sugimoto, *et al.*. Diurnal variation of the atmospheric boundary layer observed by a computer controlled laser radar [J]. *Meteorological Society of Japan*, 1980, 58: 143–148.
- 21 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. *Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 134–135.  
盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. *大气物理学*[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 134–135.
- 22 J R Garratt. *The Atmospheric Boundary Layer*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 335.
- 23 T R Oke. *Boundary Layer Climates*[M]. New York: Halsted Press, 1988: 435.
- 24 Z Sorbjan. *Structure of the Atmospheric Boundary Layer*[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1989: 317.
- 25 D J Seidel, C O Ao, K Li, *et al.*. Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: comparison of methods and uncertainty analysis[J]. *J Geophys Res*, 2010, 115(D16): D16113.