

地基差分吸收激光雷达垂直探测大气压力初步实验

洪光烈¹, 王钦^{1,2}, 王建宇^{1,2*}, 梁新栋^{1,2}, 孔伟¹, 李虎^{1,2}

¹中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 大气压力是最重要的气象要素之一。为了实现空间激光遥感大气压力, 需要先进行必要的地基激光雷达探测实验研究。以单纵模 Nd:YAG 激光器的二倍频 532 nm 激光脉冲作为泵浦源, 以 KTP(KTiOPO₄) 晶体作为非线性转换介质的光参量振荡器和光参量放大器, 产生了 760.236 nm 和 760.307 nm 波长的两种激光脉冲, 脉冲能量为 40 mJ, 采用 ϕ 350 mm 望远镜接收大气的后向散射, 从而获得了不同高度处与激光雷达之间双波长的差分光学厚度。有效探测高度为 500~4000 m, 时间分辨率为 1~5 min。实验结果表明, 差分光学厚度对应着大气层不同高度处与激光雷达间的压力差, 其对应关系的数值表达是可以期待的。

关键词 遥感; 遥感器; 差分吸收激光雷达; 光参量振荡器; 光参量放大器; 差分光学厚度; 大气压力

中图分类号 TN959.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0310003

Preliminary Investigation of Vertical Measurement of Atmospheric Pressure Using Ground-Based Differential Absorption Lidar

Hong Guanglie¹, Wang Qin^{1,2}, Wang Jianyu^{1,2*}, Liang Xindong^{1,2}, Kong Wei¹, Li Hu³

¹Key Laboratory of Space Active Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Atmospheric pressure is one of the most important meteorological parameters. In this work, to realize spaceborne laser remote sensing of atmospheric pressure, ground-based lidar measurement investigations are conducted. A 532-nm laser pulse produced by the second-frequency of a single longitudinal-mode Nd:YAG laser is used as a pump source. An optical parametric oscillator and an optical parametric amplifier using a KTP (KTiOPO₄) crystal as a nonlinear conversion medium generate two laser pulses with wavelengths of 760.236 and 760.307 nm, with the pulse energy reaching 40 mJ. A ϕ 350-mm telescope receives the backscattering of the atmosphere, the differential optical depth of two wavelengths between different altitudes and the lidar is obtained. The effective detection altitudes range of the ground-based differential absorption lidar is 500–4000 m, and the time resolution is 1–5 min. The investigations show that the differential optical depth corresponds to the pressure difference between different altitudes of the atmosphere and the lidar, and a numerical expression of the corresponding relationship can be obtained.

Key words remote sensing; remote sensor; differential absorption lidar; optical parametric oscillator; optical parametric amplifier; differential optical depth; atmospheric pressure

OCIS codes 010.0280; 280.3640; 280.1910; 120.5475

1 引言

大气压力是最重要的气象要素之一。大气压力数据的全球表面分布密度和数据质量, 对气象模式

的精确性具有重要影响。目前, 大气压力的数据主要来源于陆地和海岛气象观测站的无线电探空和地面气压计的数据。激光雷达是探测大气气象参数的有效手段之一^[1-2]。

收稿日期: 2019-09-20; 修回日期: 2019-10-14; 录用日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(61775227)

* E-mail: jywang@163.com

通过激光探测大气密度垂直分布廓线,从而可以根据大气静力学方程求取大气压力垂直分布廓线。利用单波长脉冲激光雷达探测高度范围为30~100 km内无气溶胶的清洁大气的气体分子Rayleigh体后向散射系数随高度的垂直分布,就可以获得大气分子密度随高度变化的垂直分布^[3-4]。Shibata等^[3]和 Hauchecorne等^[4]采用 Rayleigh 激光雷达探测了中层大气的密度垂直廓线和温度垂直廓线。在平流层以下,大气分子的 Rayleigh 后向散射回波与气溶胶的 Mie 后向散射(它们的中心波长相同,仅光谱宽度不同)回波混在一起,难以精确分离,高光谱分辨率激光雷达 HSRL(High Spectral Resolution Lidar)亦很难将它们精确分离^[5-6]。

美国国家航空航天局(NASA)戈达德空间飞行中心的 Korb等^[7]专家,于1983年提出了基于氧气A吸收带凹槽,用差分吸收激光雷达探测大气压力的思想;Schwemmer等^[8]于1987年阐述了差分吸收激光雷达系统的原理,并采用闪光灯泵浦宝石(Alexandrite)激光器发射了位于 13160 cm^{-1} 附近的两个波长的激光脉冲,用差分吸收激光雷达探测了大气压力。1989年,Korb等^[9]在美国东海岸进行了地基和机载实验,获得过垂直分辨率为30 m、水平分辨率为2 km,精度为0.2 kPa的实验结果。但是这一系统采用氧气的光声光谱吸收池作为发射光波长的参考基准,此参考基准易受机械振动等的干扰,所以该系统波长的长期稳定性难以保证,难以持续稳定地工作^[10]。

为了精确测量大气CO₂的干混合比,ASCENDS(Active Sensing of CO₂ Emission over Nights, Days, and Seasons)计划特别关注了大气压力的测量。NASA戈达德空间飞行中心的 Stephen 研究团队^[11-13]于2007—2013年对他们的实验进行了连续报道;他们以飞机为平台,利用光发射机向下持续发出764.7 nm附近的N个波长的脉冲串,并采用接收机接收地面对这些发射脉冲串的反射回波,然后根据多个脉冲串回波信号积累拼制出了764.7 nm附近氧气吸收谱曲线的凹槽片段,再通过透射率曲线计算出氧气的光学厚度随大气压力的变化,即可反演出地面上的大气压力。上述实验的致命弱点是单脉冲能量过小($<100\ \mu\text{J}$),这对于空间应用是难以想象的。

2 差分吸收激光雷达的原理模型

差分吸收激光雷达发出的激光束包括两种波

长;其中一种波长的激光束两次透过大气层的光吸收率随大气温度的变化不敏感,但是它的光吸收率对大气压力比较敏感,此波长称为探测波长(online);另一种波长激光束两次透过大气层的光吸收率相对较小,此波长称为参考波长(offline),它与探测波长很接近。高度在 $R_0\sim R$ 之间的大气压力差源于单位面积上 $R_0\sim R$ 之间空气柱的重量。大气准静力学方程沿高度 z 的积分为

$$p(R) - p(R_0) = \int_{R_0}^R dp = \int_{R_0}^R n(z)mg dz = \int_{R_0}^R n_{\text{O}_2}(z) \frac{mg}{0.20948} dz, \quad (1)$$

式中: R 为某大气层的海拔高度; R_0 为激光雷达的海拔高度; $p(R_0)$ 为激光雷达在海拔高度 R_0 处的大气压力; $p(R)$ 为激光雷达在海拔高度 R 处的大气压力; g 为重力加速度; m 为大气分子的平均质量; $n(z)$ 为高度 z 处大气分子的密度; $n_{\text{O}_2}(z)$ 为高度 z 处氧气分子的密度,氧气的分子数占大气分子数的固定比例为20.9%。 R_0 到 R 之间A带氧气吸收产生的光学厚度(比尔-朗伯定理)也是其吸收系数关于路径的积分,即

$$\tau_{\text{O}_2,\text{abs}} = \int_{R_0}^R n_{\text{O}_2}(z)\sigma dz, \quad (2)$$

式中: τ 为比尔定理中的光学厚度; σ 为氧气分子对A带激光的吸收截面。

$R_0\sim R$ 之间的双波长光学厚度差,也被称为差分光学厚度,即

$$\Delta\tau_{\text{O}_2,\text{abs}} = \int_{R_0}^R n_{\text{O}_2}(z)\Delta\sigma dz, \quad (3)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为氧气分子对A带双波长(online和offline)激光的吸收截面差 $\sigma(\lambda_{\text{on}}) - \sigma(\lambda_{\text{off}})$ 。

差分光学厚度 $\int_{R_0}^R n_{\text{O}_2}(z)\Delta\sigma dz$ 与 $R_0\sim R$ 之间的大气压力差 $\int_{R_0}^R n_{\text{O}_2}(z) \frac{mg}{0.20948} dz$ 存在着一对一的关系,根据online、offline回波的差异(即两种波长的激光被路径上氧分子吸收的差异)求出大气对online、offline的相对光学厚度,并修正温度引起的误差,就可以反演得到大气的压力。

S_{on} 和 S_{off} 代表探测到的online和offline光的回波功率,它们的计算公式分别为

$$S_{\text{on}}(R) = \frac{c}{2} E_{\text{on}} \frac{AT_0}{R^2} \eta \frac{\beta}{\pi} \times \exp\left\{-2 \int_{R_0}^R [n_{\text{O}_2}\sigma(\lambda_{\text{on}}) + \alpha_{\text{a,on}}(z) + \alpha_{\text{m,on}}(z)] dz\right\}, \quad (4)$$

$$S_{\text{off}}(R) = \frac{c}{2} E_{\text{off}} \frac{A T_0}{R^2} \eta \frac{\beta}{\pi} \times \exp\left\{-2 \int_{R_0}^R [n_{\text{O}_2} \sigma(\lambda_{\text{off}}) + \alpha_{\text{a,off}}(z) + \alpha_{\text{m,off}}(z)] dz\right\}, \quad (5)$$

式中： c 为光速； λ_{on} 和 λ_{off} 分别为探测波长和参考波长； η 为探测器在 760 nm 处的量子效率； T_0 为接收端的光学通光率（或者单向传输率）； A 为望远镜的有效接收面积； E_{on} 、 E_{off} 分别为出射 on、off 激光的单脉冲能量； α_{a} 、 α_{m} 分别为气溶胶、气体分子的消光系数； β 为大气分子和气溶胶的后向散射系数； $n_{\text{O}_2} \sigma(\lambda_{\text{on}})$ 和 $n_{\text{O}_2} \sigma(\lambda_{\text{off}})$ 分别为对应波长的氧气吸收系数。差分光学厚度(DOD)的变换为

$$-\int_{R_0}^R n_{\text{O}_2} [\sigma(\lambda_{\text{on}}) - \sigma(\lambda_{\text{off}})] dz = \frac{1}{2} \ln\left\{\left[\frac{S_{\text{on}}(R)}{S_{\text{off}}(R)}\right] \left(\frac{E_{\text{on}}}{E_{\text{off}}}\right)\right\}, \quad (6)$$

其中， $\frac{1}{2} \ln\left\{\left[\frac{S_{\text{on}}(R)}{S_{\text{off}}(R)}\right] \left(\frac{E_{\text{off}}}{E_{\text{on}}}\right)\right\}$ 联系着激光雷达参数的发射能量和接收功率， $\int_{R_0}^R n_{\text{O}_2} [\sigma(\lambda_{\text{on}}) - \sigma(\lambda_{\text{off}})] dz$ 与 R 、 R_0 之间的大气压力差存在着函数关系。因此，激光雷达的回波可以用来反演大气的压力差。

在氧气的 A 吸收带 (759~770 nm) 上 (如图 1 所示)，760 nm 附近和 765 nm 附近的光谱吸收系数对温度的变化不敏感。765 nm 适合用于从卫星上遥感地表大气压力^[14]。地基的激光雷达选择 760 nm 附近凹槽区的两个波长作为探测波长 online 和参考波长 offline 更合适一些^[15]，如图 2 所示。理由如下：卫星发射激光，接收地表对该脉冲的反射回波，故激光束需要两次穿过整个大气层，路径更长；而地基激光雷达探测大气对流层的大气压力廓线时，激光往返的光程较短。

760 nm 处的吸收系数相对于 765 nm 处的更大一些。760 nm 处的吸收系数随温度变化的情况，可

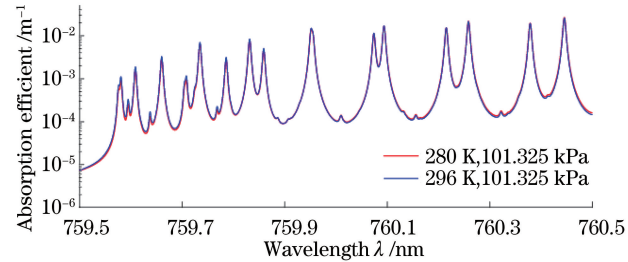


图 1 不同条件下氧气在 759.5~760.5 nm 谱段的吸收系数

Fig. 1 Absorption efficient of oxygen in range from 759.5 nm to 760.5 nm under different conditions

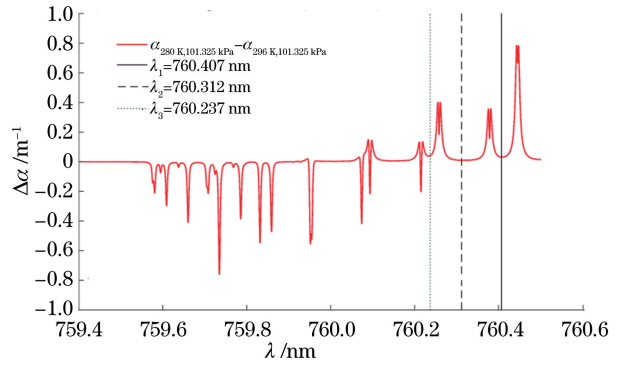


图 2 一个标准大气压下，氧气在 280 K 和 296 K 下的吸收系数差 (大气中氧气的物质的量分数为 20.9%，氮气的物质的量分数为 78.1%)

Fig. 2 Absorption coefficient difference of oxygen between 280 K and 296 K under the condition of a standard atmospheric pressure (atmospheric oxygen mole fraction is 20.9% and atmospheric nitrogen mole fraction is 78.1%)

以从吸收系数在一个大气压下温度由 296 K 降至 280 K 时的残差看出。在实验中，对于地基差分吸收激光雷达，取探测波长^[16] $\lambda_{\text{on}} = 760.236$ nm (波数为 13153.8 cm^{-1})，参考波长 $\lambda_{\text{off}} = 760.307$ nm (波数为 13152.58 cm^{-1})；探测波长和参考波长在标准大气压下的吸收系数分别为 $6.10 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ 以及 $1.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ 。

3 差分吸收激光雷达的系统装置与系统实验

差分吸收激光雷达发射机包括泵浦源、环形腔光参量振荡器、放大器、半导体种子激光器，如图 3 所示，差分吸收激光雷达的参数如表 1 所示。

实验中采用美国 Continuum 公司的窄线宽、种子注入 Nd:YAG 脉冲激光器，型号为 Powerlite™ Precision II 8000，线宽为 0.003 cm^{-1} ，基波 (波长为 1064 nm) 脉冲能量为 600 mJ，重复频率为 10 Hz，它的注入种子源 SI-2000 是掺钕的分布反馈光纤激光器。二倍频激光 (波长为 532 nm) 脉冲能量为 300 mJ，将二倍频激光脉冲作为发射机光参量振荡器和光参量放大器的泵浦源。

两台种子激光器是外腔调谐的半导体激光器 (Sacher-laser, TEC-520-770-060)，其中一个工作在 online 波长，另一个工作在 offline 波长。两束种子激光通过光开关切换轮流进入谐振腔，光纤耦合输出约 30 mW 的连续波功率，线宽不大于 1 MHz。

4 片腔镜 M1、M2、M3、M4 围成一个环形谐振

腔,两块 KTP(磷酸钛氧钾)晶体作为非线性频率转换器件,腔镜 M4 可通过压电转换器 PZT(锆钛酸铅系压电陶瓷)调谐谐振腔的周长。通过 Ramp-

Hold-Fire 技术^[18]保证泵浦光发射时,谐振腔与注入的种子激光处于谐振状态,这样可以保证信号光波长与种子光波长相等。

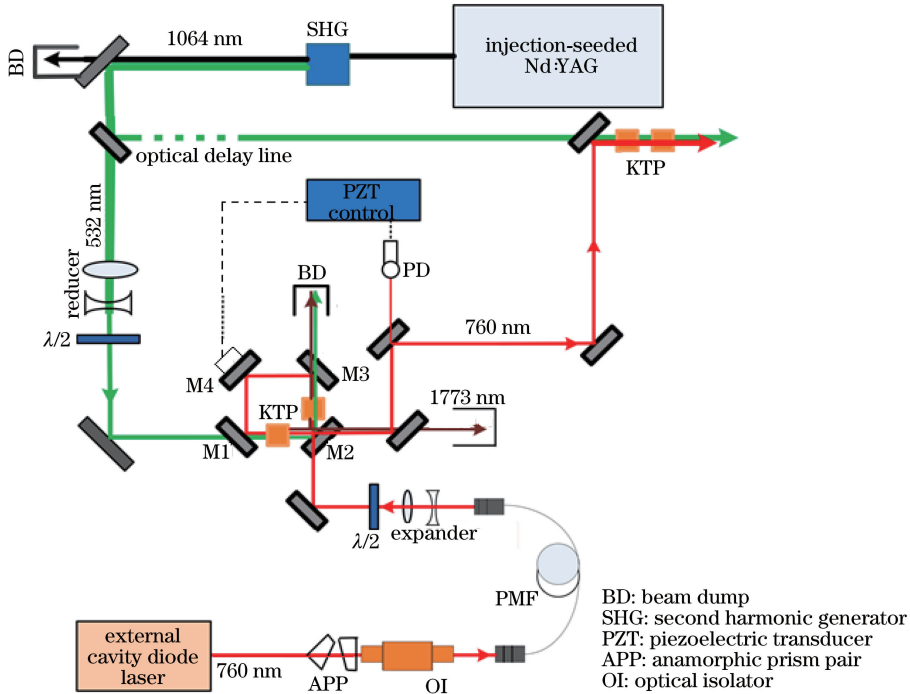


图 3 差分吸收激光雷达发射机示意图

Fig. 3 Schematic of differential absorption lidar transmitter

表 1 差分吸收激光雷达的系统参数

Table 1 Parameters for differential absorption lidar system

Parameter	Value
Transmitter	OPO and OPA ^[17]
Pulse energy /mJ	40
Pulse repetition frequency /Hz	10
Wavelength	Online: 760.236 nm Offline: 760.307 nm
Received telescope	Cassegrain, $\phi 350$ mm
Detector	Hamamatsu photon photomultipliers
Filter bandwidth /nm	10
Photomultipliers quantum efficiency	13%
Amplifier bandwidth /MHz	25
Digital sampling rate /Bit	14

参考波长 offline 和探测波长 online 相差 0.07 nm,位于同一个谐振腔的增益范围之内。同一台光发射机可以先后轮流输出两种波长的激光脉冲。

关于短于 10 ns 发射脉冲的能量监测,本文采用 s3972-Si-PIN 探测器和 OPA847 宽带跨导放大器(图 4)将光电流线性转换为电压信号(正比于发射脉冲光功率),然后送给 TC510 双斜数字积分器

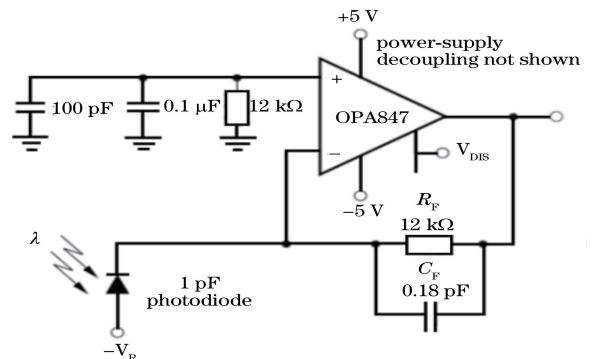


图 4 宽带、超低噪声电压反馈放大器

Fig. 4 Wideband, ultra-low noise, voltage-feedback operational amplifier

(图 5)将这个电压信号积分成电荷值(正比于发射光脉冲能量)并输出数字信号。

开始反演之前,首先需要从在地面上得到的压强和温度数据开始建立用于反演的初始温度和压强廓线,这里从 1976 年美国标准大气模型中低层大气的温度压强廓线建立方式开始,公式为

$$\begin{cases} T_{st}(z) = T(0) - a_T \cdot z \\ p_{st}(z) = p(0) \cdot \left[\frac{T(0)}{T(z)} \right]^{\frac{a_T}{a_p}} \end{cases} \quad (7)$$

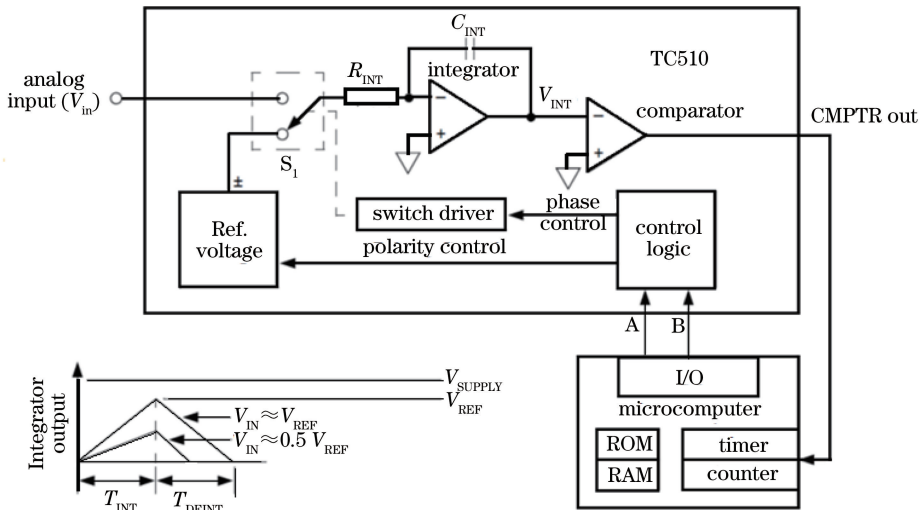


图 5 TC510 高精度双斜积分式模-数转换器

Fig. 5 High resolution numerical-integration techniques speed dual-slope analog-digital conversion

式中： $T_{st}(z)$ 、 $p_{st}(z)$ 为 z 处的温度和压强； $T(0)$ 、 $p(0)$ 为地表处测得的温度和压强，单位分别为 K 和 Pa； $a_T=0.006545$ K/m， $a_p=0.034164$ K/m。

然后改变 $T(0)$ 的值，得到不同高度处的温度、压强廓线 $T_{st}(z, i)$ 、 $p_{st}(z, i)$ 。根据这些温度和压强廓线，可以通过氧气吸收系数模型得到不同的差

分光学厚度 $\Delta\tau_{O_2,abs}(z, i)$ ，如图 6 所示，此时就可以利用 $\Delta\tau_{O_2,abs}(z, i)$ 和 $p_{st}(z, i)$ 拟合出一条 $\Delta\tau_{O_2,abs}(z, i)-p_n(z)$ 曲线，然后将上一步骤中求得的高度 z 处的差分光学厚度 $\Delta\tau_{O_2,abs,n}(z, i)$ 代入该曲线方程，就可以得到高度 z 处的压强 $p_n(z)$ 。该反演方法的框图如图 7 所示。

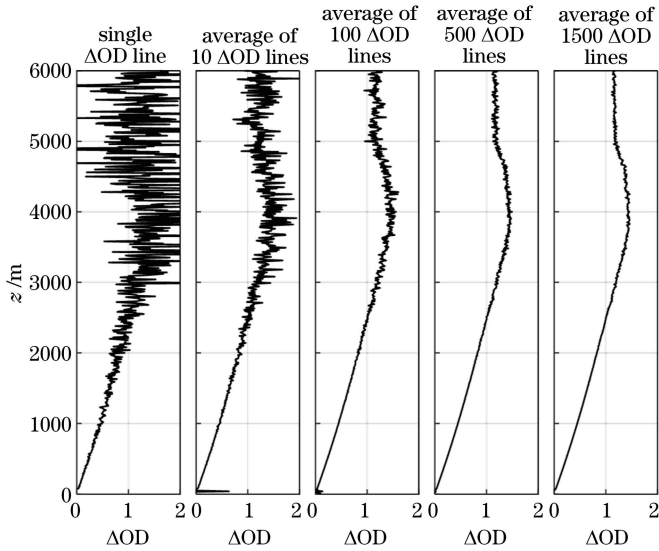


图 6 760 nm 差分吸收激光雷达于 2019 年 2 月 25 日夜探测的数据经处理后得到的从地面到不同高度 z 处的差分光学厚度 (ΔOD)

Fig. 6 Differential optical depth (ΔOD) from ground to different altitude z obtained by processing detection data from 760 nm differential absorption lidar at February 25th, 2019 night

为了验证实验结果，本课题组取得了 2019 年 2 月 26 日早晨 7 点，距离实验地点最近的宝山气象站的无线电探空气球数据，如图 8 所示。通过该组数据可以计算得到理论上的差分光学厚度，其与激光雷达测量得到的差分光学厚度的比较如图 9 所示，

可以看到，在 4 km 以内，两者差别小于 5%。

由于对所有高度反演会使得计算量很大，所以一般关注几个固定高度的气压，如 1000, 2000, 3000, 4000 m 处。通过前一节的数据处理和反演最终得到了 2019 年 2 月 26 日凌晨 2:15—4:15 时间

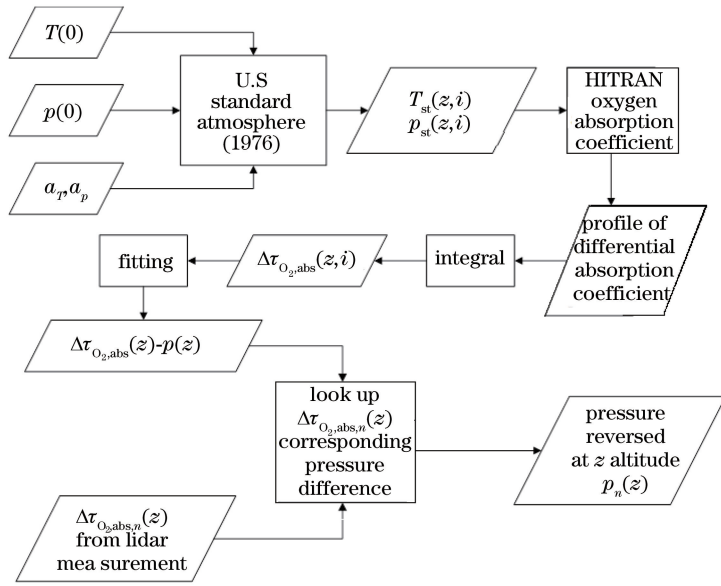


图 7 地基激光雷达反演大气压强框图

Fig. 7 Ground-based lidar inversion of atmospheric pressure

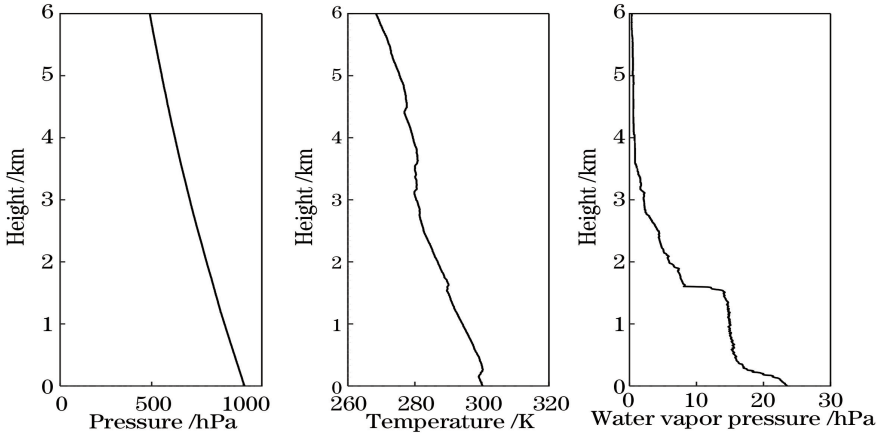


图 8 2019 年 2 月 26 日无线电探空气球测得的大气压力、大气温度和大气中水汽的垂直分布廓线

Fig. 8 Profile of atmospheric pressure, atmospheric temperature and atmospheric vapor from radiosonde on February 26th, 2019

段内不同高度处压强的变化,如图 10 所示,时间分辨率分别为 5 min 和 1 min。不同高度不同时间分辨率下的随机误差如表 2 所示。

表 2 不同高度不同时间分辨率下的随机误差
Table 2 Random error at different altitudes and differential time resolutions

Altitude /m	Random error /hPa	
	1 min	5 min
1000	0.67	0.29
2000	1.57	0.91
3000	9.70	3.72
4000	12.68	11.05

差分光学厚度 $\Delta\tau_{O_2,abs}$ 与激光雷达数据之间存在的关系为

$$\Delta\tau_{O_2,abs} = \frac{1}{2} \left[\ln \frac{E(\lambda_{off})}{E(\lambda_{on})} - \ln \frac{E_0(\lambda_{off})}{E_0(\lambda_{on})} \right], \quad (8)$$

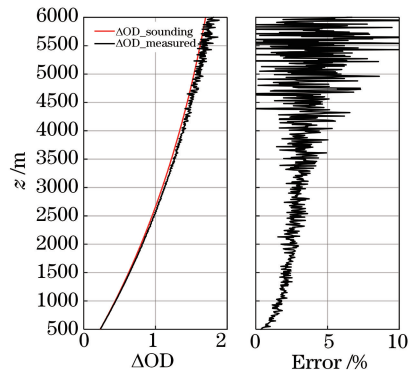


图 9 由探空气球数据计算得到的差分光学厚度与激光雷达测量得到的差分光学厚度(5 min 平均)

Fig. 9 Differential optical depth calculated from radiosonde data and differential optical thickness data (5 min average) measured by lidar

$$\delta\Delta\tau_{O_2,abs} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{\delta E(\lambda_{off})}{E(\lambda_{off})} \right]^2 + \left[\frac{\delta E_0(\lambda_{off})}{E_0(\lambda_{off})} \right]^2 + \left[\frac{\delta E(\lambda_{on})}{E(\lambda_{on})} \right]^2 + \left[\frac{\delta E_0(\lambda_{on})}{E_0(\lambda_{on})} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

假设脉冲能量测量误差为 0.5%，则 $\frac{\delta E(\lambda_{off})}{E(\lambda_{off})} \approx$

$\frac{\delta E_0(\lambda_{off})}{E_0(\lambda_{off})} = \frac{\delta E_0(\lambda_{on})}{E_0(\lambda_{on})} = 0.5\%$ 。可以看出，能量测量误差带来的差分光学厚度的测量误差 $\delta\Delta\tau_{O_2,abs}$ 约为 0.5%。

4 分析与讨论

对照图 9 和图 10 可以看出，大气高度 z 处的压力与大气地表压力的差值，与高度 z 处至地面间的差分光学厚度之间存在着对应关系。这一对应关系的解析表达目前尚不能给出，但其数值解可以期待。

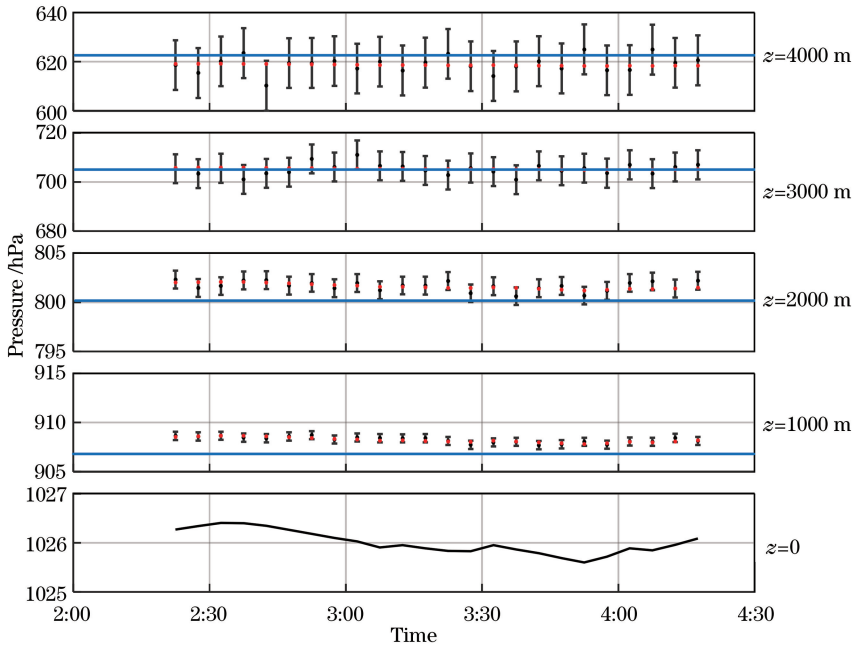


图 10 最终反演得到的 2019 年 2 月 26 日凌晨 2:15—4:15 时间段内不同高度处压强的变化(时间分辨率为 5 min, 图中带有误差棒的黑点为反演得到的压强及其统计误差, 红点为通过美国标准大气模型中的公式计算得到的压强, 蓝线为 26 日早上 7:00 宝山站探空气球测量得到的数据)

Fig. 10 Pressure of inversion at different altitudes from 2:15 to 4:15 in the morning of February 26th, 2019 (the time resolution is 5 min. The black point with the error bar in the figure is the pressure obtained by the inversion, and its statistical error; the red point is the pressure calculated by the formula in the American standard atmospheric model, and the blue line is the data measured by the air ball measured at 7:00 am on the 26th at Baozhan station)

5 结 论

地基差分吸收激光雷达探测对流层下半部分的初步实验表明，在 760 nm 氧气 A 吸收带凹槽区，地基差分吸收激光雷达探测的双波长光学厚度差与相同高度处的大气压力差之间存在着对应关系，这一

由于没有实时比对数据，所以将根据美国标准大气模型计算得到的压强值作为参考，结果发现反演数据与模式数据偏离不大，说明反演数据具有一定的可信度。在比较反演数据与探空气球数据时发现两者有较大差别，差别主要来自两方面：一是探空气球与激光雷达的实验时间相差了 4 h，所以探空气球数据只能作粗略参考；二是由于在反演过程中没有考虑水汽的影响，而大气中的水汽主要富集在被探测的高度范围内。目前，所建立的差分光学厚度与大气压力差之间的数值关系，是基于 1976 U.S 中纬度大气模式而建立的，与真实的映射关系相比存在着精度不足、发射脉冲能量的测量精度不足等问题。另外，实验装置中滤光片的带宽为 10 nm，其背景光比较强，氧气和氮气纯转动 Raman 后向散射全部进入探测器，这也会使得探测精度下降。

对应关系的数值解是值得期待的。

探测系统有许多可以改进的地方：改进电子电路，提高激光发射能量的探测精度，并进行必要的计量；通过大量的数据积累和数值逼近，在差分光学厚度差与大气压力差之间建立更精确的数值映射关系；将望远镜口径从 $\phi 350$ mm 增大到 $\phi 500$ mm，滤

光片带宽从 10 nm 压窄为 1.5 nm,以提高信噪比。这些改进措施都可以增大探测高度,提高激光雷达的数据质量。

致谢 感谢中国气象局气象探测中心的姚波博士和赵培涛博士给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Hong G L, Li J T, Kong W, et al. 935 nm differential absorption lidar system and water vapor profiles in convective boundary layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0201003.
洪光烈, 李嘉唐, 孔伟, 等. 935 nm 差分吸收激光雷达系统及对流边界层水汽廓线探测[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0201003.
- [2] Wang Y F, Gao F, Zhu C X, et al. Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328004.
王玉峰, 高飞, 朱承炫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0328004.
- [3] Shibata T, Kobuchi M, Maeda M. Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with a XeF lidar[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(5): 685-687.
- [4] Hauchecorne A, Chanin M L. Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 70 km[J]. *Geophysical Research Letters*, 1980, 7(8): 565-568.
- [5] Shimizu H, Lee S A, She C Y. High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(9): 1373-1381.
- [6] She C Y, Alvarez R J, Caldwell L M, et al. High-spectral-resolution Rayleigh-Mie lidar measurement of aerosol and atmospheric profiles[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(7): 541-543.
- [7] Korb C L, Weng C Y. Differential absorption lidar technique for measurement of the atmospheric pressure profile[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(23): 3759-3770.
- [8] Schwemmer G K, Dombrowski M, Korb C L, et al. A lidar system for measuring atmospheric pressure and temperature profiles[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1987, 58(12): 2226-2237.
- [9] Korb C L, Schwemmer G K, Dombrowski M, et al. Airborne and ground based lidar measurements of the atmospheric pressure profile[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(15): 3015-3020.
- [10] Flamant C N, Schwemmer G K, Korb C L, et al. Pressure measurements using an airborne differential absorption lidar. Part I: analysis of the systematic error sources[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, 16(5): 561-574.
- [11] Stephen M, Krainak M, Riris H, et al. Narrowband, tunable, frequency-doubled, erbium-doped fiber-amplified transmitter[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2073-2075.
- [12] Stephen M A, Mao J P, Abshire J B, et al. Oxygen spectroscopy laser sounding instrument for remote sensing of atmospheric pressure [C] // *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, March 17-19, 2008, St. Petersburg, Florida, United States. Washington, D.C.: OSA, 2008: JMA19.
- [13] Riris H, Rodriguez M D, Allan G R, et al. Airborne lidar measurements of atmospheric pressure made using the oxygen A-band[C] // *Lasers, Sources, and Related Photonic Devices*, January 29-February 1, 2012, San Diego, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2012: LT2B.5.
- [14] Riris H, Rodriguez M, Allan G R, et al. Pulsed airborne lidar measurements of atmospheric optical depth using the Oxygen A-band at 765 nm[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(25): 6369-6382.
- [15] Hong G L, Wang Q, Kong W, et al. Operating wavelength selection for spaceborne differential absorption lidar measuring surface pressure[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(2): 206-211.
洪光烈, 王钦, 孔伟, 等. 空间差分吸收激光雷达探测地表大气压力的波长选择[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(2): 206-211.
- [16] Wang Q. Research on 760 nm Lidar for Atmospheric Pressure Measurement[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
王钦. 基于 760 nm 波段激光雷达探测大气压强的方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [17] Hong G L, Wang Q, Xiao C L, et al. A laser transmitter of differential absorption lidar for atmospheric pressure measurement[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(4): 451-458.
洪光烈, 王钦, 肖春雷, 等. 探测大气压力的差分吸收激光雷达的一种光发射机[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(4): 451-458.
- [18] He Y, Baxter G W, Orr B J. Locking the cavity of a pulsed periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator to the wavelength of a continuous-wave injection seeder by an "intensity-dip" method[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(8): 3203-3213.