

# 空间差分吸收激光雷达探测地表大气压力的波长选择

洪光烈<sup>1,2</sup>, 王 钦<sup>1,3</sup>, 孔 伟<sup>1,2</sup>, 王建宇<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**根据美国标准大气模型进行了蒙特卡诺模拟, 仿真研究了大气温度的不确定性对大气压力探测带来的随机误差和系统偏差, 发现在氧气的 A 带中选择 764.765 nm 和 765.094 nm 为探测波长 online, 选择位于两者之间的 764.948 nm 为参考波长 offline, 是获得较小探测误差的一种方案; 优化的探测波长既不在 A 带的吸收线上, 亦不在某两吸收线之间的凹槽中间, 而是位于 A 带吸收线 p13 和 p14 线的侧翼, 这一结果对于建立积分路径差分吸收激光雷达探测地表大气压力的遥感仪器, 起到参考作用。

**关键词:**大气光学; 路径积分差分吸收激光雷达; 大气压力; 探测波长; 参考波长

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## Operating wavelength selection for spaceborne differential absorption lidar measuring surface pressure

HONG Guang-Lie<sup>1,2</sup>, WANG Qin<sup>1,3</sup>, KONG Wei<sup>1,2</sup>, WANG Jian-Yu<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Active Opto-Electronics technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** We report the selection of the lidar instrument operating wavelengths, the Monte Carlo simulation was made, knowledge that imprecise temperature affect on the systemic bias and random errors of surface pressure measurement was developed. When 764.765 nm and 765.094 nm were selected as detection wavelengths, then 764.948 nm between both online was selected as reference wavelengths, the emulation research show that measurement error is least. Excellent detection wavelength was neither in absorption peak value wavelength, nor was in trough between two absorption line, that were on wing of p13 and p14 absorption line of A band. This result has directive function to build up an IPDA for measurement of surface pressure.

**Key words:** atmosphere optics, integrated path differential absorption lidar, surface pressure, detection wavelength, reference wavelength

**PACS:** 02.70.Uu, 42.68.-w, 42.68.Wt

## 引言

大气压力是最重要的气象要素之一, 关于大气压力数据的全球表面分布密度和数据质量, 对于气象模式的精确性影响重大; 目前关于大气压力的数

据, 主要来源于陆地气象观测站的探空气球和地面气压计的数据. 由于气象观测站必须适合专业人员长期固定工作, 所以海洋和高原, 环境恶劣的沙漠和极地等不易建站的广大地区, 往往缺乏大气压力数据. 因此卫星上安置大气压力遥感仪器十分有意义,

收稿日期: 2017-7-18, 修回日期: 2017-12-20

Received date: 2017-7-18, revised date: 2017-12-20

基金项目: 中国科学院空间主动光电技术国防科技创新重点实验室基金(CXJJ-17S024), 国家自然科学基金(61775227)

**Foundation items:** Supported by Research of Innovation Program of Key Laboratory of Active Opto-Electronics Technology (CXJJ-17S024), National Natural Science Foundation of China (61775227)

作者简介 (Biography): 洪光烈 (1966-), 性别男, 安徽庐江人, 研究员, 博士, 主要研究领域为激光雷达大气遥感. E-mail: glhong@mail.sitp.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

可以在不同区域增加大气压力数据的面上分布密度,改善气象预报精度.而差分吸收激光雷达是最有希望成为卫星遥感地表大气压力的仪器.差分吸收激光雷达探测大气压力基本方法为,利用激光脉冲垂直向下发射到大气中,再由地面或云顶反射回去,然后根据所选波长的差分光学厚度,计算地表或云顶的大气压力.世界气象组织希望地球表面大气压力测量精度能达到 0.1%<sup>[1]</sup>.首先要解决选择怎样波长的激光脉冲才是最接近实际应用需求的.

NASA 戈达德太空飞行中心,大气实验室的 C. Lurence Korb 等专家,1983 年提出氧气 A 带吸收槽的思想,利用差分吸收激光雷达探测大气压力<sup>[2]</sup>; Schwemmer 等人于 1987 年阐述了差分吸收激光雷达系统原理<sup>[3]</sup>,并采用闪光灯泵浦翠宝石(Alexandrite)激光器发射位于 13 160 cm<sup>-1</sup>附近的两个波长,差分吸收激光雷达探测了大气压力.1989 年报道 C. Laurence Korb<sup>[4]</sup>等人在美国东海岸进行地基或机载实验,曾获得过垂直分辨率 30 m、水平分辨率 2 km,精度 2 mbr 的实验结果,这是很大的成功,但是激光器的波长的长期稳定性和线宽仍然需要改进.1999 年,C. N. Flamant, G. K. Schwemmer, C. L. Korb, K. D. Evans, 和 S. P. Palm,详细地分析了上述机载差分吸收激光雷达系统误差的来源<sup>[5]</sup>.

NASA 戈达德太空飞行中心的 Mark Stephen, Michael Krainak, Haris Riris 等人和 Sigma Space Corporation 的 Graham R. Allan 研究团队于 2007~2013 年连续报道<sup>[6-9]</sup>他们以飞机为平台,通过探测大气压力引起 764.7 nm 附近波段激光大气透过率(氧气吸收率、大气光学厚度)的变化,来反演大气压力(差)的实验.作为 ASCENDS(Active Sensing of CO<sub>2</sub> Emissions over Nights, Days and Seasons)计划的一部分工作<sup>[10]</sup>,为了提高大气二氧化碳柱浓度混合比的探测精度,他们在 764.7~764.9 nm 之间,选择了多个探测波长 online 和参考波长 offline 脉冲,探测自地球表面到飞机平台之间的光学厚度,该实验采用微脉冲激光雷达体制,单脉冲能量明显偏小,并不适合于空间应用.

## 1 空间差分吸收激光雷达的工作方式

激光雷达安置在太阳同步轨道上的低轨卫星上,绕地球飞行,从卫星上发射激光束,激光束随卫星移动而落在全球各地的地表或云层顶部,从地球表面或云顶反射的激光再次穿过大气层,被卫星上的望远镜收集并检测.这样就能获得全球各地的光

学厚度的数据,有望增加地表或云顶大气压力的覆盖范围和覆盖密度.从卫星上发出的激光束包括两种波长,其中一种波长 online(探测波长)的激光束两次穿过大气层,它的透过率对大气压力敏感;另一种波长 offline(参考波长)激光束两次透过大气层的光吸收率很小,光的损耗主要因为大气散射而非大气吸收;地球表面的压力是单位面上自地球表面以上单位空气柱重量关于高度的积分<sup>[11]</sup>:

$$p = \int_{h_0}^{h_s} dp = \int_{h_0}^{h_s} n_d(z) g dz \quad (1)$$

认为卫星处大气压力为 0,  $n_d(z)$  高度  $z$  处大气分子数密度,  $g$  重力加速度;而自地球表面到卫星整层大气的光学厚度,也就是吸收系数关于高度的积分:

$$\tau_{abs} = \int_{h_0}^{h_s} n_{o_2}(z) \sigma_{abs}(z) dz \quad (2)$$

$\sigma_{abs}$  氧气的吸收截面,  $n_{o_2}(z)$  高度  $z$  处大气中氧气分子数密度,  $n_{o_2}(z)$  与  $n_d(z)$  的比值(0.209 5)在不同高度  $z$  都是恒定的,由式(1)和式(2)可见地表压力  $p$  和整层大气光学厚度  $\tau_{abs}$  两者之间存在数值关系;这两种波长的相近,除了氧气光吸收之外,其他如 Mie 散射和 Rayleigh 散射都一样,比较两波长的光学厚度  $\tau_{abs}$ ,可以反演出激光束足印处大气压力  $p_{sfc}$ .

根据 online/offline 回波的差异(即被氧分子吸收的差异)求出大气对 online/offline 相对光光学厚度差  $\Delta\tau_{abs}$ ,从而反演大气的地表压力.对于空间 IPDA(integrated path differential absorption lidar)路径积分差分吸收激光雷达系统,对应的发射机和接收机工作波长  $\lambda_i$ ,发射脉冲能量  $E_0(\lambda_i)$ ,接收来自地面反射能量  $E(\lambda_i)$ ,地面的反射系数  $\gamma(\lambda_i)$ ,  $i = on, off$ ,激光雷达方程如下:

$$E(\lambda_i) = \eta E_0(\lambda_i) \frac{\gamma(\lambda_i)}{\pi} \cdot \frac{A}{h_s^2} e^{-2\tau_{abs}(\lambda_i)} e^{-2\tau_{sca}(\lambda_i)} \quad (3)$$

其中  $\eta$  为探测器在 A 带(759~770 nm)的量子效率,  $h_s$  是激光雷达离地面的距离,  $\tau_{abs}$  氧气吸收产生单程光学厚度,  $\tau_{sca}$  是大气分子(Rayleigh)和颗粒(Mie)散射产生的单程光学厚度. IPDA 激光雷达系统测量的两个或更多波长回波能量(吸收较明显的波长称为“online”和低吸收的参考波长称为“offline”).两种波长回波能量的比值:

$$\frac{E(\lambda_{off})}{E(\lambda_{on})} = \frac{E_0(\lambda_{off})}{E_0(\lambda_{on})} \cdot \frac{\gamma(\lambda_{off})}{\gamma(\lambda_{on})} \cdot \frac{e^{-2\tau_{abs}(\lambda_{off})}}{e^{-2\tau_{abs}(\lambda_{on})}} \cdot \frac{e^{-2\tau_{sca}(\lambda_{off})}}{e^{-2\tau_{sca}(\lambda_{on})}} \quad (4)$$

这些波长相差很近,可以认为地表反射率相等,大气散射消光系数相等:

$$\frac{\gamma(\lambda_{\text{off}})}{\gamma(\lambda_{\text{on}})} = 1$$

$$\frac{e^{-2\tau_{\text{sca}}(\lambda_{\text{off}})}}{e^{-2\tau_{\text{sca}}(\lambda_{\text{on}})}} = 1$$

因此不同波长回波的比值表示为:

$$\frac{E(\lambda_{\text{off}})}{E(\lambda_{\text{on}})} = \frac{E_0(\lambda_{\text{off}})}{E_0(\lambda_{\text{on}})} \cdot \frac{e^{-2\tau_{\text{abs}}(\lambda_{\text{off}})}}{e^{-2\tau_{\text{abs}}(\lambda_{\text{on}})}} \quad (5)$$

把不同波长的光学厚度差记为  $\Delta\tau_{\text{abs}}$ ,它可以表示为:

$$\Delta\tau_{\text{abs}} = \tau_{\text{abs}}(\lambda_{\text{on}}) - \tau_{\text{abs}}(\lambda_{\text{off}})$$

$$= \frac{1}{2} \left[ \ln \frac{E(\lambda_{\text{off}})}{E(\lambda_{\text{on}})} - \ln \frac{E_0(\lambda_{\text{off}})}{E_0(\lambda_{\text{on}})} \right] \quad (6)$$

根据朗伯比尔定理,激光在大气中因氧气的单程吸收产生的光学厚度可以表示为:

$$\tau_{\text{abs}}(\lambda_i) = \int_{h_0}^{h_s} n_{O_2} \sigma_{\text{abs}}(\lambda_i) dz \quad (7)$$

这里  $h_s$  激光雷达系统的高度,  $h_0$  地球表面的高度;把准静态方程  $dp = -\rho g dz$  改写为:

$$dz = -\frac{dp}{\rho g} \quad (8)$$

把式(8)带入式(7),由高度积分变换为大气压力积分

$$\tau_{\text{abs}}(\lambda_i) = \int_{h_0}^{h_s} n_{O_2} \sigma_{\text{abs}}(\lambda_i) dz \quad (9)$$

$$\rho = (1 + r_v) \rho_d = (1 + r_v) n_d m_d \quad (10)$$

$$\tau_{\text{abs}}(\lambda_i) = \int_0^{p_{\text{sc}}} \sigma_{\text{abs}}(\lambda_i, p) \frac{r_{O_2}}{m_d g (1 + r_v)} dp \quad (11)$$

地球表面的大气压力  $p_{\text{sc}}$ ,氧气的混合比  $r_{O_2} = 0.2095$ ,  $r_v$  大气中水汽的混合比,  $m_d$  干空气的分子量.因此,有了光学厚度差与地表大气压力之间的关系:

$$\Delta\tau_{\text{abs}} = \frac{r_{O_2}}{m_d g_0} \int_0^{p_{\text{sc}}} \Delta\sigma_{\text{abs}}[p, T(p), r_v(p)] \frac{1}{1 + r_v(p)} dp \quad (12)$$

其中  $\Delta\sigma_{\text{abs}}$  双波长吸收截面差是关于大气压力  $p$ 、大气温度  $T$  的函数.因此,可以把  $\Delta\sigma_{\text{abs}}$  写成  $\Delta\sigma_{\text{abs}}[p, T(p), r_v(p)]$ . 方程左边是激光雷达回波、根据式(6)的可测量,方程右边是大气模式参数(第3节),这样就建立了地表大气压力和 online/offline 光学厚度差之间联系.

## 2 大气模式

借鉴美国标准大气模式(the U. S standard atmosphere(1976))<sup>[12]</sup>,温度  $T(h)$  以 K 式温标,大气压力  $P(h)$ ,作为高度  $h$  的函数,距离海平面 11 km 以下的大气层表示为:

$$T(h) = 288.15 - 0.006545 h$$

$$P(h) = 1.013 \times 10^5 \left[ \frac{288.15}{T(h)} \right]^{\left( \frac{0.034164}{0.006545} \right)} \quad (13)$$

从 11 ~ 20 km 大气层温度和压力表示为:

$$T(h) = 216.65$$

$$P(h) = 2.269 \times 10^4 e^{\left( -\frac{0.034164(h-11000)}{216.65} \right)} \quad (14)$$

自 20 ~ 32 km 的大气层温度和压力可以表示为:

$$T(h) = 216.65 + 0.0010(h - 20000)$$

$$P(h) = 5528.0 \left[ \frac{216.65}{T(h)} \right]^{\left( \frac{0.034164}{0.0010} \right)} \quad (15)$$

从 32 ~ 47 km 大气的温度和压力表示为:

$$T(h) = 228.65 + 0.0028(h - 32000)$$

$$P(h) = 888.8 \left[ \frac{228.65}{T(h)} \right]^{\left( \frac{0.034164}{0.0028} \right)} \quad (16)$$

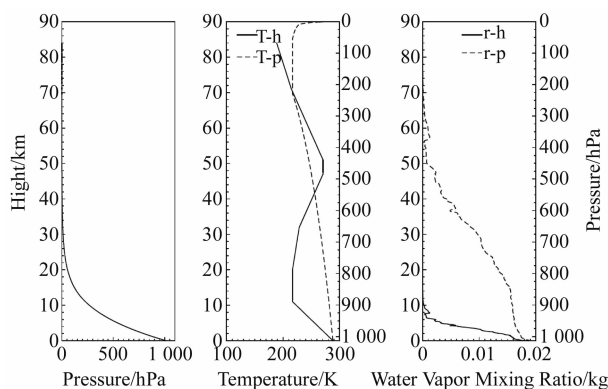


图1 美国标准大气模式:大气压力-高度( $p-h$ )廓线,大气温度-高度( $T-h$ )廓线,大气湿度-高度变化( $r-h$ )的廓线;大气温度-大气压力( $T-p$ )关系,大气水汽-大气压力( $r-p$ )关系曲线

Fig. 1 The U. S standard atmosphere mode(1976): atmospheric pressure-high ( $p-h$ ) profile, atmospheric temperature-high ( $T-h$ ) profile, atmospheric humidity-high ( $r-h$ ) profile; The relation curve of atmospheric temperature and pressure ( $T-p$ ), The relation curve of water vapor and atmospheric pressure ( $T-p$ )

氮气的分子数密度与压力和温度的关系可以表示为:

$$N(h) = \left( \frac{28.964 \text{ kg/kmol}}{8314 \text{ J/kmol} \cdot \text{K}} \right) \frac{P(h)}{T(h)} = 0.03484 \frac{P(h)}{T(h)} \text{ kg/m}^3 \quad (17)$$

### 3 测量误差的蒙特卡诺模拟<sup>[13]</sup>

差分光学厚度:

$$\Delta\tau_{abs} = \frac{r_{O_2}}{m_d g_0} \int_0^{p_{sfc}} \frac{\Delta\sigma_{abs}[p, T(p), r_v(p)]}{1 + r_v(p)} dp \quad (18)$$

如果仅受测量误差影响测得的差分光学厚度

$$\Delta\tau'_{abs} = \frac{r_{O_2}}{m_d g_0} \int_0^{p'_{sfc}} \frac{\Delta\sigma_{abs}[p, T(p), r_v(p)]}{1 + r_v(p)} dp \quad (19)$$

若两式比较

$$p'_{sfc} - p_{sfc} = \delta p_{sfc; \Delta OD} \quad (20)$$

$$\Delta\tau'_{abs}(p) - \Delta\tau_{abs}(p) = \delta\Delta\tau_{abs} \quad (21)$$

那么

$$\delta p_{sfc; \Delta OD} = \left\{ \frac{r_{O_2}}{m_d g} \cdot \frac{\Delta\sigma_{abs}[p_{sfc}, T(p_{sfc}), r_v(p_{sfc})]}{1 + r_v(p_{sfc})} \right\}^{-1} \delta\Delta\tau_{abs} \quad (22)$$

因为有激光雷达的光学厚度  $\Delta\tau_{abs}$  数据

$$\Delta\tau_{abs} = \frac{1}{2} \left[ \ln \frac{E(\lambda_{off})}{E(\lambda_{on})} - \ln \frac{E_0(\lambda_{off})}{E_0(\lambda_{on})} \right] \quad (23)$$

$$\delta\Delta\tau_{abs} = \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{\delta E(\lambda_{off})}{E(\lambda_{off})} \right)^2 + \left( \frac{\delta E_0(\lambda_{off})}{E_0(\lambda_{off})} \right)^2 + \left( \frac{\delta E(\lambda_{on})}{E(\lambda_{on})} \right)^2 + \left( \frac{\delta E_0(\lambda_{on})}{E_0(\lambda_{on})} \right)^2} \quad (24)$$

假定脉冲能量测量误差 0.1%.

$$\frac{\delta E(\lambda_{off})}{E(\lambda_{off})} \approx \frac{\delta E(\lambda_{on})}{E(\lambda_{on})} = \frac{\delta E(\lambda_{on})}{E(\lambda_{on})} = 0.1\%$$

从式(20)看出,光学厚度的测量误差  $\delta\Delta\tau_{abs}$  大约 0.1%.

真实大气差分光学厚度

$$\Delta\tau_{abs}(p) = \frac{r_{O_2}}{m_d g_0} \int_0^{p_{sfc}} \frac{\Delta\sigma_{abs}[p, T(p), r_v(p)]}{1 + r_v(p)} dp \quad (25)$$

将用于模拟的大气温度廓线记为  $T'(P)$ , 将用于模拟的大气水汽混合比廓线记为  $r'_v(p)$ , 将由数据仿真得到的地表大气压强记为  $p'_{sfc}$ , 则数据仿真大气差分光学厚度:

$$\Delta\tau_{abs}''(p) = \frac{r_{O_2}}{m_d g_0} \int_0^{p'_{sfc}} \frac{\Delta\sigma_{abs}[p, T'(p), r'_v(p)]}{1 + r'_v(p)} dp \quad (26)$$

故由温度引起的误差为:

$$\begin{aligned} \delta p_{sfc; T} &= (p'_{sfc} - p_{sfc})_T \\ &= \left\{ \frac{\Delta\sigma_{abs}[p_{sfc}, T'(p_{sfc}), r'_v(p_{sfc})]}{1 + r'_v(p_{sfc})} \right\}^{-1} \cdot \\ &\quad \int_0^{p_{sfc}} \left\{ \frac{\partial \Delta\sigma_{abs}[T(p) - T'(p)]}{\partial T} \right\} dp \end{aligned} \quad (27)$$

假设地面至 30 km 之间温度误差(error)2 K, 30 km 以上高度处温度误差(error)4 K, 温度偏差(bias)1 K, 应用蒙特卡洛方法进行仿真:

(1) 构造或描述概率过程; (2) 实现从已知概率分布抽样; (3) 建立各种估计量. 这里产生 1 000 组带有误差的温度廓线  $T'(P)$ , 代入式(27)后求得 1 000 组压强误差  $\delta p_{sfc; T}$ , 最后计算其均方根值即为温度误差引起的压强误差(error)  $\delta p_e$ . 其平均值为压强偏差(bias)  $\delta p_b$ , 压强偏差(bias)主要由温度的偏差和分辨率引起.

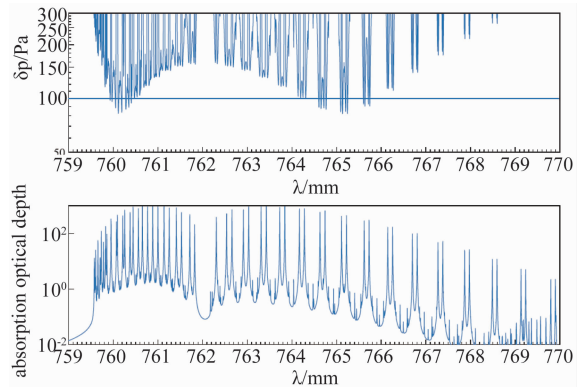


图2 模拟计算 A 带全谱段光学厚度和地表大气压强误差  $\delta p$

Fig. 2 Simulated calculation for relation of surface pressure error  $\delta p$  and absorption optical depth to A band wavelength

图3 从左至右, 4 个波长分别为 764.716、764.765、765.094、765.133 nm 温度引起的误差(error)较小, 764.716、764.765 nm 会产生正偏差(bias); 765.094、765.133 nm 会产生负偏差(bias); 因此探测波长选择 764.765 nm 和 765.094 nm, 它们产生的温度偏差(bias)一正一负, 可以相互抵消一部分; 可见误差(error)随温度变化较小的探测波长既不在氧气的吸收峰上, 也不再两个吸收峰之间凹槽区的正中间, 而是位于 A 带吸收线 p13 支和 p14 支的侧翼; 选择两个波长之间的波长 764.948 nm 为参考波长, 它的吸收系数相对较小; 两个探测波长和

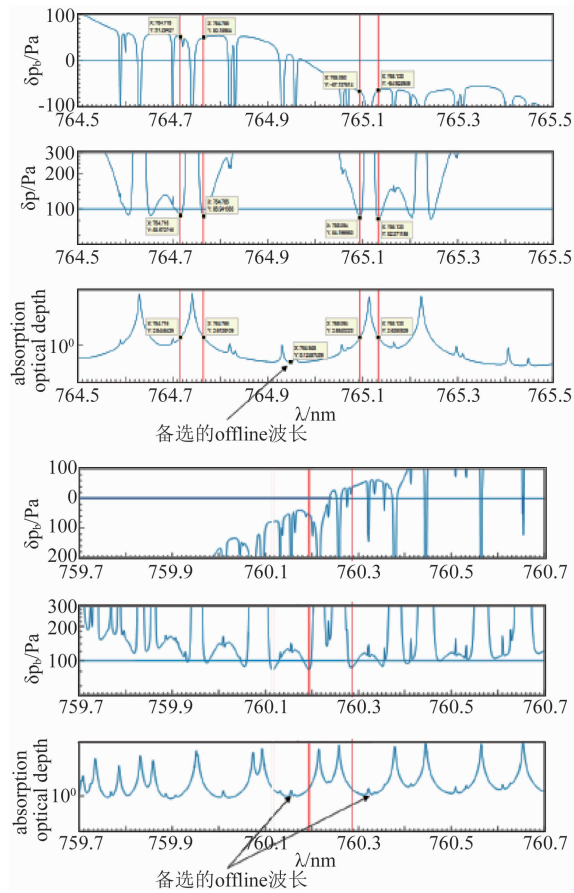


图3 应用 760 nm/765 nm 波段,大气温度引起的大气压力测量误差  $\delta p_e$  和测量偏差  $\delta p_b$

Fig. 3 Atmospheric pressure measurement error  $\delta p_e$  and measurement bias  $\delta p_b$  from uncertainty atmospheric temperature at 760 nm/765 nm band

一个参考波长可以得到两组光学厚度差  $\Delta\tau_{abs1}$  和  $\Delta\tau_{abs2}$ , 两者平均成为新的光学厚度差  $\Delta\tau_{abs}$ , 用于反演地表大气压力, 两者的正负偏差可能抵消. 最终使用两个 online 作为探测波长, 将探测得到的结果取平均之后, 式(6)变形为式(28), 图4的仿真显示, 温度带来的误差明显减小了.

$$\begin{aligned} \Delta\tau_{abs} &= \tau_{abs}(\lambda_{on}) - \tau_{abs}(\lambda_{off}) \\ &= \frac{1}{4} \left[ \ln \frac{E(\lambda_{off})}{E(\lambda_{on1})} - \ln \frac{E_0(\lambda_{off})}{E_0(\lambda_{on1})} + \ln \frac{E(\lambda_{off})}{E(\lambda_{on2})} - \ln \frac{E_0(\lambda_{off})}{E_0(\lambda_{on2})} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

760.2 ~ 760.3 nm 处 online-波长和 offline-波长对整层大气的光学吸收厚度差别较小, 765 nm 处 online 和 offline 对整层大气的光学吸收厚度差别较大; 也可以说是说 760 nm 处探测波长与参考波长吸收截面值相差较小, 而 765 nm 处探测波长与参考波长吸收截面值相差较大; 因此在 765 nm 波段选择探测波长和参考波长更合适.

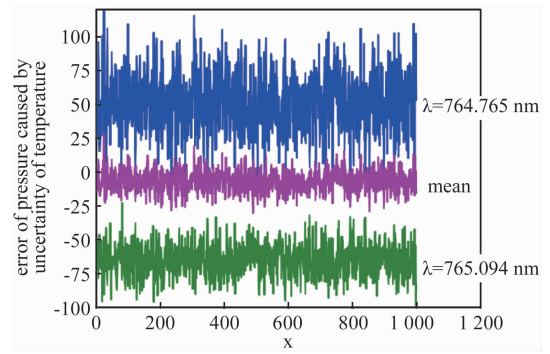


图4 单一波长作为探测波长 online, 和两个波长作为探测波长 online 温度不确定引起偏差的对比(横坐标 x 表示随机样本序号)

Fig. 4 Error from uncertain temperature with single wavelength as detection wavelength online, contrast to two wavelengths as detection wavelengths online

同理, 由湿度引起的误差为:

$$\begin{aligned} \delta p_{sfc; r_v} &= (p'_{sfc} - p_{sfc})_{r_v} \\ &= \left\{ \frac{\Delta\sigma_{abs} [p_{sfc}, T'(p_{sfc}), r'_v(p_{sfc})]}{1 + r'_v(p_{sfc})} \right\}^{-1} \\ &= \int_0^{p_{sfc}} \left\{ \frac{\frac{\partial \Delta\sigma_{abs}}{\partial r_v} [r_v(p) - r'_v(p)]}{1 + r_v(p)} - \frac{\Delta\sigma_{abs} [p, T'(p), r'_v(p)] \cdot [r_v(p) - r'_v(p)]}{(1 + r_v(p))} \right\} dp \end{aligned} \quad (29)$$

除了在 A 带的吸收峰波长以外, 图5显示的误差曲线几乎是平线. 即可认为, 水汽引起的误差, 几乎跟吸收峰以外的波长关系不大, 而且是以系统偏差为主, 水汽所引起的随机误差(error)相对于系统偏差(bias)小得多, 可以忽略. 水汽所引起的系统偏差总是负值, 也就是说水汽的存在, 如果不加修正的话, 会导致大气压力反演数值小于真实数值.

理论上说, 将温度、水汽参数等带入大气压力的数值反演过程中, 通过必要的修正, 总反演误差是可以做到 100 Pa 以内.

## 4 结论

空间差分吸收激光雷达测量大气地表压力, 其误差来源三个方面, 其一, 激光发射脉冲和地面反射脉冲能量的测量精度; 其二, 大气温度廓线的不确定性对氧气吸收截面的影响; 第三, 大气中水汽含量的不确定性对大气压力的影响. 其中第二个因素对探测波长的选择有决定性的影响. 蒙特卡诺模拟的仿真计算表明, 在氧气 A 吸收带 760.2 nm 附近和 765

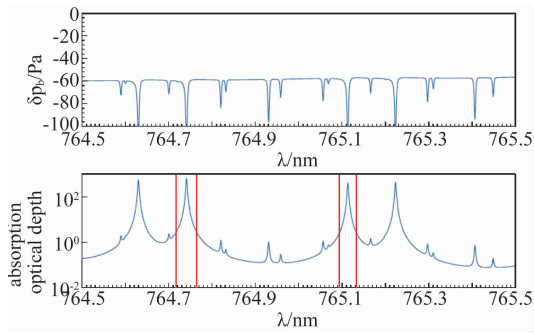


图5 水汽引起的大气压力误差

Fig. 5 Surface pressure error from water vapor

nm 两处附近选择波长,温度的不确定性产生的随机误差较小;假如选择 764.765 nm 和 765.094 nm 为探测波长,选择位于两者之间的 764.948 nm 为参考波长,是获得较小探测误差的优势方案;这两个探测波长产生一正一负的系统偏差 (bias),所以两个探测波长,一个参考波长,可以减小最终结果的系统偏差。考虑到 online/offline 差分光学厚度差,在 764.7 ~ 765.0 nm 区域选择探测波长和参考波长比 760.2 ~ 760.3 nm 区域选择波长对更为有利。

感谢中国气象局气象探测中心的姚波博士、赵培涛博士的热心帮助!

## References

- [1] WMO. Requirements defined for Air pressure (at surface) [R]. Available: (2011) <http://www.wmo-sat.info/oscar/variables/view/10>.
- [2] 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.
- [4] ZHANG Yong, LU Qiu-Quan, LIU Wei, et al. Design of a 220 GHz frequency tripler based on EM model of Schottky Diodes [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (张勇, 卢秋全, 刘伟, 等. 基于肖特基势垒二极管三维电磁模型的 220GHz 三倍频器, *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(4): 405-411.
- [5] MENG J, ZHANG D H, JIANG C H, et al. Research on the practical design method of 225 GHz tripler [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (孟进, 张德海, 蒋长宏, 等. 225 GHz 三倍频器实用设计方法, *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(2):191-195.
- [6] Wang H, Merritt D P M, Brewster N, et al. 280 GHz frequency multiplied source for meteorological Doppler radar applications [J]. *8th UK, Europe, China Millimeter Waves and THz Technology Workshop (UCMMT)*, 2015, 1-4.
- [7] Xue Q, Shum K M, Chan C H. Low conversion-loss fourth

- [3] Schwemmer G K, Dombrowski M, Korb C L, et al. A lidar system for measuring atmospheric pressure and temperature profiles [J]. *Rev. Sci. Instrum.* 1987, **58**(12), 2226-2237.
- [4] 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.
- [5] Flamant C N, Schwemmer G K, Korb C. L, et al. Pressure measurements using and airborne differential absorption lidar. Part I: analysis of the systematic error sources [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1999, **16**:561-574.
- [6] Stephen M, Krainak M, Riris H, et al. Narrowband, tunable, frequency-doubled, erbiumdoped fiber-amplified transmitter [J]. *Opt. Letters*, 2007, **32**:2073-2075.
- [7] Stephen M A, Mao J P, Abshire J B, et al. Oxygen spectroscopy laser sounding instrument for remote sensing of atmospheric pressure [J]. © 2008 OSA.
- [8] Riris H, Rodriguez M D, Allan G R, et al. Airborne lidar measurements of atmospheric pressure made using the oxygen A-band [J]. *Lasers, Sources, and Related Photonic Devices Technical Digest* © 2012 OSA.
- [9] Riris H, Rodriguez M, Allan G R, et al. Pulsed airborne lidar measurements of atmospheric optical depth using the Oxygen A-band at 765nm [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(25):6369-6382.
- [10] Crowell S, Rayner P, Zaccheo S, et al. Impacts of atmospheric state uncertainty on O<sub>2</sub> measurement requirements for the ASCENDS mission [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(7):2685-2697.
- [11] Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. *Atmospheric Physics second*, Beijing University press (盛裴轩, 毛节泰, 李建国, et al. 大气物理学. 第 2 版. 北京大学出版社), 2013: 30-32.
- [12] Kovalev V A, Eichinger W E. *Elastic lidar theory, practice, and analysis methods* [M]. A John Wiley & Sons, INC., Publication, 2004.
- [13] O'Brien D M, Mitchell R M, English S A, et al. Airborne measurements of air mass from O<sub>2</sub> A-band absorption spectra [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, **15**(6):1272-1286.

(上接第 205 页)

- [4] ZHANG Yong, LU Qiu-Quan, LIU Wei, et al. Design of a 220 GHz frequency tripler based on EM model of Schottky Diodes [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (张勇, 卢秋全, 刘伟, 等. 基于肖特基势垒二极管三维电磁模型的 220GHz 三倍频器, *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(4): 405-411.
- [5] MENG J, ZHANG D H, JIANG C H, et al. Research on the practical design method of 225 GHz tripler [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (孟进, 张德海, 蒋长宏, 等. 225 GHz 三倍频器实用设计方法, *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(2):191-195.
- [6] Wang H, Merritt D P M, Brewster N, et al. 280 GHz frequency multiplied source for meteorological Doppler radar applications [J]. *8th UK, Europe, China Millimeter Waves and THz Technology Workshop (UCMMT)*, 2015, 1-4.
- [7] Xue Q, Shum K M, Chan C H. Low conversion-loss fourth subharmonic mixers incorporating CMRC for millimeter-wave applications [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, **51**(5):1449-1454.
- [8] JIANG Jun, LIU Jie, SHI Xiang-Yang, et al. 340 GHz quadrupler based on Schottky Diodes and Improved CSMRs [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (蒋均, 刘杰, 石向阳, 等. 基于肖特基变容二极管和改进型 CSMRs 滤波器单级 340GHz 四倍频器, *红外与毫米波学报*), 2017, **36**(2):214-219.
- [9] Zhang B, Fan Y, Zhang S X, et al. 110 GHz high performance varistor tripler [C]. *International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology*, Chengdu, China, 2012, 1-2.
- [10] Maestrini A, Ward J S, Gill J J. A 540 - 640-GHz high-efficiency four-anode frequency tripler [J], *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53**(9): 2835-2843.