

## 激光与光电子学进展

## 激光掩星探测大气温压反演方法的仿真分析

李虎<sup>1,3</sup>, 王建宇<sup>1,3\*</sup>, 洪光烈<sup>1,3</sup>, 王一楠<sup>2</sup><sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;<sup>2</sup>中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对激光掩星探测对流层中上层到平流层下层高度范围内大气温度和压强的反演方法,进行了研究和仿真分析。选择对温度不敏感而对压强敏感的吸收线,利用吸收系数与吸收截面和压强的关系,通过迭代方式求解得到压强。选择弱吸收峰附近的吸收线,利用吸收系数与压强和温度的关系,根据反演得到的压强值通过迭代方式求解得到温度。为减小大气中其他气体吸收以及大气散射等消光因素对反演结果的影响,仿真过程采用差分波长的方法,在氧气 A 吸收带内,选取合适的吸收线,利用激光掩星差分透过率数据由 Abel 积分反变换反演得到各个激光轨迹切点高度处的差分吸收系数廓线,然后利用差分吸收系数反演各个切点高度处的压强和温度。仿真结果显示:压强反演误差主要受差分吸收系数反演误差的影响,随高度下降呈不断增大的趋势,最大误差约为 6%;根据反演得到的压强值对温度进行反演,温度反演误差主要受压强和差分吸收系数反演误差的影响;两种影响部分抵消,最大温度反演误差在 5 km 高度附近约为 1.5 K。建立误差模型进行分析,对反演误差中出现的一些变化趋势和影响因素进行解释。在去除差分吸收系数反演误差的条件下,对压强和温度进行 1 次循环求解,得到压强最大反演误差约为 0.3%,温度最大反演误差约为 1 K,将该条件下温度和压强的反演误差与有差分吸收系数反演误差时的反演误差进行对比,证实了减小差分吸收系数反演误差的重要性。

**关键词** 大气光学; 温度和压强反演; 差分吸收系数; 迭代法; 误差分析

中图分类号 P407.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0301002

## Simulation Analysis of Inversion Method of Atmospheric Temperature and Pressure for Laser Occultation

Li Hu<sup>1,3</sup>, Wang Jianyu<sup>1,3\*</sup>, Hong Guanglie<sup>1,3</sup>, Wang Yinan<sup>2</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Space Active Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;<sup>3</sup>Chinese Academy of Sciences University, Beijing 100049, China

**Abstract** The inversion method of temperature and pressure from the upper and middle troposphere to the lower stratosphere is studied and simulated. An absorption line is selected, which is not sensitive to temperature but sensitive to pressure, and the relationship among the absorption cross section, pressure and the absorption coefficient is used to determine the pressure by using the iterative method. An absorption line is selected near the weak absorption peak and the relationship among the absorption coefficient, pressure and temperature is used according to

收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-06-23; 录用日期: 2020-07-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61775227)、中国科学院中层大气和全球环境探测重点实验室开放基金

\*E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

the retrieved pressure value to determine the temperature by using the iterative method. In order to reduce the influence of other absorption and scattering factors on the inversion results, the simulation process adopts the method of differential wavelength. In the oxygen absorption band, the appropriate absorption line is selected, and the profile of the differential absorption coefficient at the tangent altitude of each laser track is obtained by retrieving the simulated data of the laser occultation differential transmittance from the Abel integral inverse transformation, and then the pressure and temperature at each tangent altitude are retrieved using the differential absorption coefficient. The simulation results show that the inversion error of pressure is primarily affected by the inversion error of the differential absorption coefficient, which increases with altitude decreasing, and the maximum error is approximately 6%; the inversion error of temperature is affected at the same time by the inversion error of pressure and the differential absorption coefficient; the two influences are partially offset, and the maximum error is 1.5 K near an altitude of 5 km. Through analysis of the error model, some change trends and influence factors in the inversion error are explained. Under the condition of eliminating the inversion error of the differential absorption coefficient, the pressure and temperature are solved once in a cycle, the maximum inversion error of pressure is approximately 0.3%, and the temperature is approximately 1 K. The comparison between this inversion error and the inversion error of the differential absorption coefficient highlights the importance of reducing the latter.

**Key words** atmospheric optics; temperature and pressure inversion; differential absorption coefficient; iteration method; error analysis

**OCIS codes** 010.0280; 280.5475; 280.6780; 280.1910

## 1 引言

大气对流层中上层到平流层下层(5~35 km),对天气和气候的影响很大,其成分与地球的辐射平衡有关,其化学混合物和热结构目前处于变化状态,所以探测该区间温度和压强等大气热力学参数具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。此外,温度和压强的探测可以为水汽等大气气体成分的同时探测提供大气状态参数。

激光掩星探测大气温度和压强相较于空基探测或地基探测是一个新的探测方式,同时具有大动态范围、高精度、高垂直分辨率和全球覆盖的优点。在这种技术中,探测信号从发射端发出,穿过地球大气,传输到大气边缘的接收端,发射端和接收端是独立的,发射端和接收端所处的卫星平台的轨道运动导致信号轨迹的近地点在大气中向下或向上变化,因此该技术可以提供大气的垂直廓线扫描图。该图常被用来进行大气热力学参数以及大气气体成分的探测。掩星探测技术的发展经历了最开始的无线电掩星、后来的微波掩星以及国内外近十年逐步开始研究的低轨星间激光掩星三个阶段。

无线电掩星和微波掩星可以用于对流层顶至平流层高度区间温度、压强的探测,但无法进行高分辨率、高精度探测,这是由于电磁波衍射效应导致垂直分辨率有限所致。而激光掩星相比较于其他探测方式,具有鲜明的优越性:激光波束比微波窄得多,有利于获得更高的垂直分辨率;窄线宽的

激光波长可以描绘大气成分的特征光谱,对于大气成分探测很有利;激光掩星采用主动光源,可以自由选择探测波段;激光器线宽极窄,利于实现超光谱分辨率的大气吸收谱探测,利于极大提高数据的反演精度。

利用激光掩星数据,通过线型拟合方法同时得到温度和压强两个参数的方法存在较大的拟合误差<sup>[4]</sup>,所以本文提出先利用吸收系数反演压强,再根据反演得到的压强结果进行温度反演的方法,以大气模型中相应参数作为“真实值”,结合工程实际情况,使用差分波长对反演方法进行仿真,然后建立差分吸收系数误差影响压强反演误差的数学模型,以及压强误差和差分吸收系数误差影响温度反演误差的数学模型,最后根据误差传递模型对仿真结果中存在的一些问题进行了解释。

## 2 反演方法

激光掩星获取的数据是激光从发射端卫星发出穿过大气后到达接收端卫星的透过率。本研究将透过率代入比尔-朗伯定律求解得到激光穿过大气的光学厚度,根据光学厚度数据由 Abel 积分反演<sup>[5-7]</sup>反演得到大气中对应于各个激光轨迹切点高度的消光系数廓线。

### 2.1 压强反演方法

多项研究中利用氧气 A 吸收带激光进行星载试验<sup>[8-10]</sup>,并进行机载验证<sup>[11-13]</sup>,他们均选择合适的

吸收线进行压强测量。A 吸收带范围内氧气吸收截面最低温度灵敏度出现在 760 nm 和 765 nm 附近<sup>[14]</sup>, 其中 760 nm 附近的谱线太强, 不适用于空间遥感, 765 nm 附近的吸收线较弱, 适用于空间遥感, 因此本研究选择 764.7 nm 的氧气吸收线 (online) 用于压强的掩星探测, 对应的参考线 (offline) 为 764.92 nm, 如图 1(a) 所示。该吸收线位于跃迁波长 764.6296 nm 和 764.7407 nm 中间, 对应的吸收截面主要受压力展宽效应的影响, 对压强敏感, 但

对温度不敏感, 且不受其他大气成分干扰的影响<sup>[15]</sup>。

图 1(b)、(c) 分别展示了 764.7 nm 波长对应氧气吸收截面随温度和压强的变化关系, 由图可知该吸收线处吸收截面具有对温度不敏感但对压强敏感的特点, 所以可以对大气模型中的温度和压强添加一定范围的随机误差作为温度估计值和压强初始值, 根据反演得到的吸收系数值, 对压强进行求解。

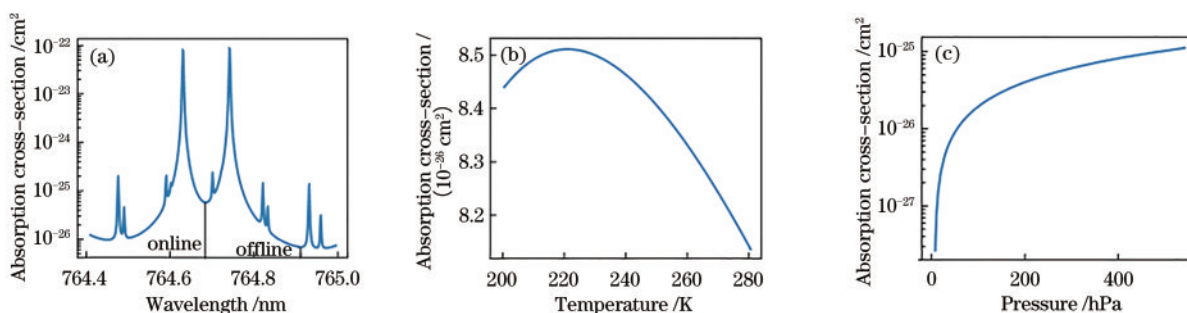


图 1 764 nm 波长附近不同条件下的氧气吸收截面。(a) 在 10 km 高空用于压强掩星探测的氧气吸收线和参考线位置; (b) 压强为 400 hPa 时, 氧气吸收截面随温度变化; (c) 温度为 250 K 时, 氧气吸收截面随压强变化

Fig. 1 Oxygen absorption cross-section in different conditions near 764 nm wavelength. (a) Position of oxygen absorption line and reference line for pressure inversion at 10 km; (b) oxygen absorption cross-section varies with temperature at 400 hPa; (c) oxygen absorption cross-section varies with pressure at 250 K

氧气吸收系数  $k$  可以表示为

$$k = q \left( \frac{p}{k_B T} \right) \sigma, \quad (1)$$

式中:  $q$  是氧气在空气中的体积混合比;  $T$  和  $p$  分别是大气任一高度处的温度和压强;  $k_B$  是玻尔兹曼常数;  $\sigma$  是氧气吸收截面, 可利用 Voigt 线型函数<sup>[16]</sup> 以及 HITRAN 数据库 (high-resolution transmission molecular absorption database) 在一定温度、压强和气体分压条件下计算得到。

由(1)式可得

$$p = \frac{k k_B T}{q \sigma}, \quad (2)$$

根据(2)式可通过迭代方法求解压强, 迭代公式为

$$p_{i+1} = \frac{k' k_B T'}{q \sigma(p_i)}, \quad (3)$$

式中:  $p_i$  和  $p_{i+1}$  分别是前后两次迭代压强的旧值和新值; 带上标 (') 的变量表示与大气模型中对应参数“真实值”有一定偏差的估计参数和反演参数, 其中  $k'$  为通过 Abel 积分反变换反演得到的有误差的吸收系数,  $T'$  为温度估计值。氧气在干空气中的体积混合比稳定在 20.95%, 在湿空气中的体积混合比有微

小波动, 本研究用  $q = 0.2095$  进行近似反演计算。

从图 1(c) 变化关系可以看出, 压强越大, 计算得到的吸收截面越大, 反之越小。若压强值  $p_i$  偏大, 则计算得到的吸收截面  $\sigma(p_i)$  也偏大。从(3)式中可以看出, 计算得到的压强值  $p_{i+1}$  偏小, 所以可以通过不断迭代来求解实际压强值。但在仿真过程中发现, 通过该策略迭代得到的压强值误差不断振荡, 迭代过程难以收敛。因此本研究采取新的迭代策略, 步骤如下: 1) 比较  $p_{i+1}$  与  $p_i$ 。若差值  $(p_{i+1} - p_i)$  为负, 则说明  $p_i$  偏大, 将其进行缩小, 缩小因子为 0.999; 若误差为正, 则说明  $p_i$  偏小, 将其进行放大, 放大因子为 1.001。2) 将放缩后的压强值重新代入(3)式中进行求解, 重复上述过程, 在前后两次结果相对偏差  $(p_{i+1} - p_i)/p_i$  小于 0.005 时终止迭代。3) 求解出满足精度要求的压强值, 且迭代过程收敛较快。具体流程如图 2 所示。

## 2.2 温度反演方法

精确的温度反演需要选择一个具有适当线强度和温度灵敏度的分子吸收线, 而线强度和温度灵敏度都取决于基态能级<sup>[17-18]</sup>, 较高的基态能级将导致较

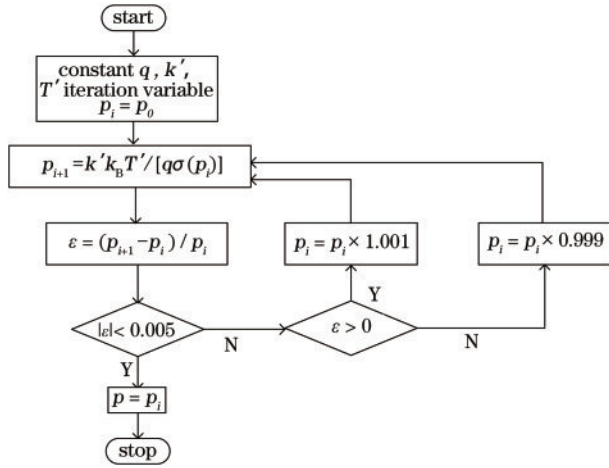


图 2 压强迭代求解流程图

Fig. 2 Flow chart of pressure iterative solution

高的温度灵敏度和较弱的线强度。此外还应考虑掩星探测高度范围的限制。因为本研究的探测范围下限设为 5 km, 吸收强度很大, 所以应尽可能选择靠近弱吸收峰的吸收线。综合上述因素, 最终选择氧气 A 带的吸收线 769.79759 nm。为了避开峰值而降低吸收强度, 该吸收线在吸收峰 769.79581 nm 右偏 0.00178 nm 位置处, 如图 3 所示。

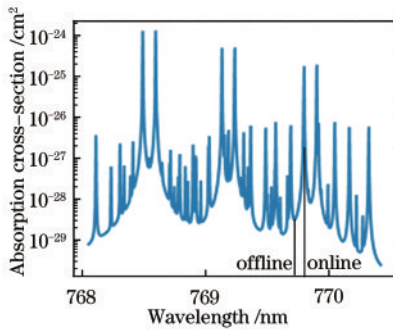


图 3 温度反演吸收线和参考线位置(10 km)

Fig. 3 Position of absorption line and reference line for temperature retrieval(10 km)

对应于跃迁波长  $\nu_0$  位于波长  $\nu$  处的氧气吸收系数, 可根据(1)式展开为

$$k(\nu) = q \left( \frac{p}{k_B T} \right) S(T) f(\nu - \nu_0), \quad (4)$$

其中  $S$  是吸收线强,  $f$  是吸收谱的线型函数。

吸收线强可以表示为

$$\frac{S(T)}{S(T_0)} = \frac{T_0 \exp(-c_2 E''/T)}{T \exp(-c_2 E''/T_0)}, \quad (5)$$

其中  $E''$  为低态跃迁能级,  $T_0$  为参考温度值 296 K,  $c_2 = hc/k_B$ ,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中光速。

记  $C = \left( \frac{T_0}{k_B} \right) S(T_0) \exp(c_2 E''/T_0)$ , 则(4)式可以

重写为

$$k(\nu) = Cq \left( \frac{p}{T^2} \right) \exp(-c_2 E''/T) f(\nu - \nu_0), \quad (6)$$

故

$$T = \frac{c_2 E''}{\ln(Cqf) - \ln(kT^2/p)}. \quad (7)$$

在给定温度初始值条件下, 利用反演得到的压强值, 通过(7)式进行温度的迭代求解, 迭代公式为

$$T_{i+1} = \frac{c_2 E''}{\ln(Cqf_i) - \ln(k'T_i^2/p)}, \quad (8)$$

其中  $p'$  为存在误差的压强反演值,  $f_i$  为温度和压强分别为  $T_i$  和  $p'$  时的计算值。给定温度初始值, 通过(8)式不断迭代可得温度值。

### 3 仿真结果与分析

以 NRL-MSISE-00 大气温度和压强模型以及大气传输计算软件 FASCODE (FASt Atmospheric Signature CODE) 中水汽模型进行掩星模拟, 利用差分吸收方法, 得到对应不同轨迹切点高度的掩星激光差分透过率, 将差分透过率转换得到相应的差分光学厚度, 然后利用 Abel 积分反变换由差分光学厚度反演得到差分吸收系数, 并将该差分吸收系数作为压强和温度反演原理中吸收系数的近似值。其中模拟过程使用的大气模型温度和压强值作为“真实值”, 为“反演值”提供参考比较, 温度反演误差用绝对误差(|反演值-真实值|)表示, 差分吸收系数和压强反演误差用相对误差(|反演值-真实值|/真实值)表示。

#### 3.1 压强反演结果

掩星模拟压强时得到的对应不同切点高度的差分透过率廓线如图 4(a) 所示, 利用 Abel 积分反变换直接积分方法<sup>[7]</sup>, 反演计算压强得到的差分吸收系数相对误差如图 4(b) 所示。因为掩星激光切点高度的离散性特点(仿真过程中 18 km 以下切点高度间隔设置为 0.5 km, 18 km 以上设置为 1 km), 从高到低的误差存在累积效应, 故差分吸收系数相对误差随高度降低而增大。

利用反演压强得到的不同切点高度处差分吸收系数, 按照 2.1 节中介绍的压强反演方法进行反演。温度估计值为模型温度添加 -10~10 K 范围内随机误差后的值, 压强迭代初始值  $p_0$  为模型压强添加 -10%~10% 范围内随机误差后的值, 压强反演结果相对大气模型中“真实值”的相对误差如图 5 所示。

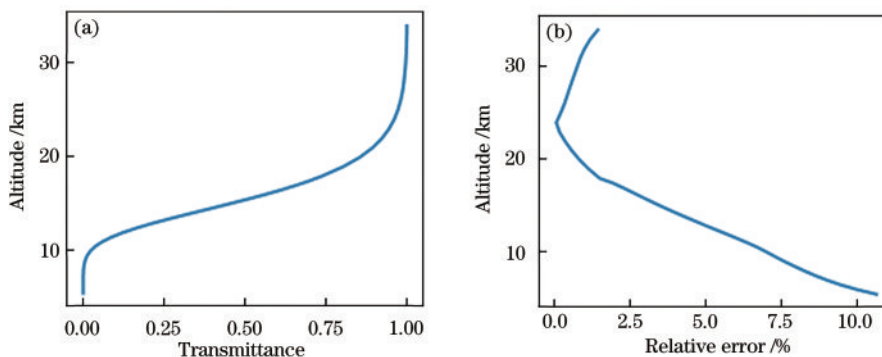


图 4 764.7 nm 波长对应的仿真结果。(a)模拟得到不同切点高度的差分透过率;(b)反演得到不同切点高度处差分吸收系数的相对误差

Fig. 4 Results of simulation corresponding to 764.7 nm wavelength. (a) Differential transmittance corresponding to different tangent altitudes obtained by simulation; (b) relative error of differential absorption coefficient by inversion at different tangent altitudes

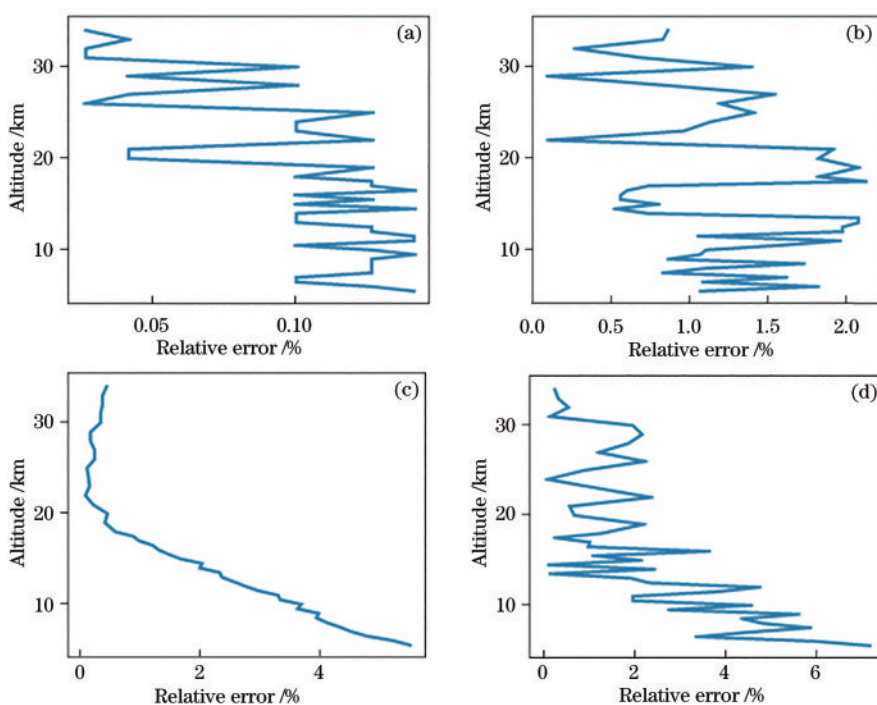


图 5 不同条件下压强反演相对误差。(a)无温度误差和差分吸收系数反演误差;(b)仅温度误差;(c)仅差分吸收系数反演误差;(d)同时有温度误差和差分吸收系数反演误差

Fig. 5 Relative error of inversion pressure at different conditions. (a) Without temperature error and inversion error of differential absorption coefficient; (b) with only temperature error; (c) with only inversion of differential absorption coefficient; (d) with both temperature error and inversion error of differential absorption coefficient

去除温度误差和差分吸收系数反演误差时,压强反演误差在 0.15% 范围内振荡,无明显规律,如图 5(a)所示;存在温度误差时,压强反演误差在 2% 范围内振荡,无明显规律,如图 5(b)所示;存在差分吸收系数反演误差时,压强反演误差在 20 km 以下逐渐增大,至 5 km 处最大约为 6%,如图 5(c)所示;同时存在温度误差和差分吸收系数反演误差时,压

强反演误差变化趋势与只有差分吸收系数反演误差时基本一致,对其叠加只有温度误差时的压强反演振荡可得图 5(d)。

由图 5 中不同条件下的压强反演结果可知,压强反演误差主要受差分吸收系数反演误差的影响。差分吸收系数存在反演误差,误差因子为  $\gamma$ ,反演得到差分吸收系数与模型值的关系为  $k' = \gamma k$ ,这是因

为图 4(b)中呈现的是绝对误差,所以为正值,而实际的仿真结果为  $k' < k$ , 则有  $0 < \gamma < 1$ , 故利用(3)式求解的压强存在误差。

(3)式可重写为

$$p_{i+1} = \frac{k'k_B T'}{q\sigma(p_i)} = \frac{\gamma}{\sigma(p_i)} \cdot \frac{kk_B T'}{q} \quad (9)$$

因为  $\sigma$  随  $p$  增大而增大,由(9)式知  $p \cdot \sigma \propto \gamma$ , 且  $0 < \gamma <$

1,所以压强迭代结果相对模型中的“真实值”偏小。由图 4(b)可知,随高度下降,差分吸收系数反演误差因子  $\gamma$  减小,对应的压强迭代结果相对“真实值”偏差增大。

### 3.2 温度反演结果

掩星模拟温度得到对应不同切点高度的差分透过率廓线如图 6(a)所示,由 Abel 积分反变换反演温度得到的差分吸收系数相对误差如图 6(b)所示。

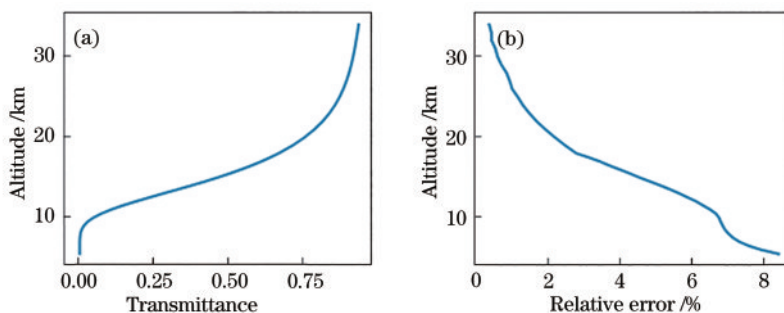


图 6 769.79759 nm 波长对应的仿真结果。(a)模拟得到不同切点高度的差分透过率;(b)反演得到差分吸收系数相对误差  
Fig. 6 Results of simulation corresponding to 769.79759 nm wavelength. (a) Differential transmittance corresponding to different tangent altitudes obtained by simulation; (b) relative error of differential absorption coefficient by inversion at different tangent altitudes

利用反演温度得到的不同切点高度处的差分吸收系数,按照 2.1 节中介绍的反演方法进行温度反演。压强值由压强反演结果提供,温度迭代初始

值  $T_0$  为模型温度添加  $-10 \sim 10$  K 范围内随机误差后的值,温度反演结果相对模型中的“真实值”的绝对误差如图 7 所示。

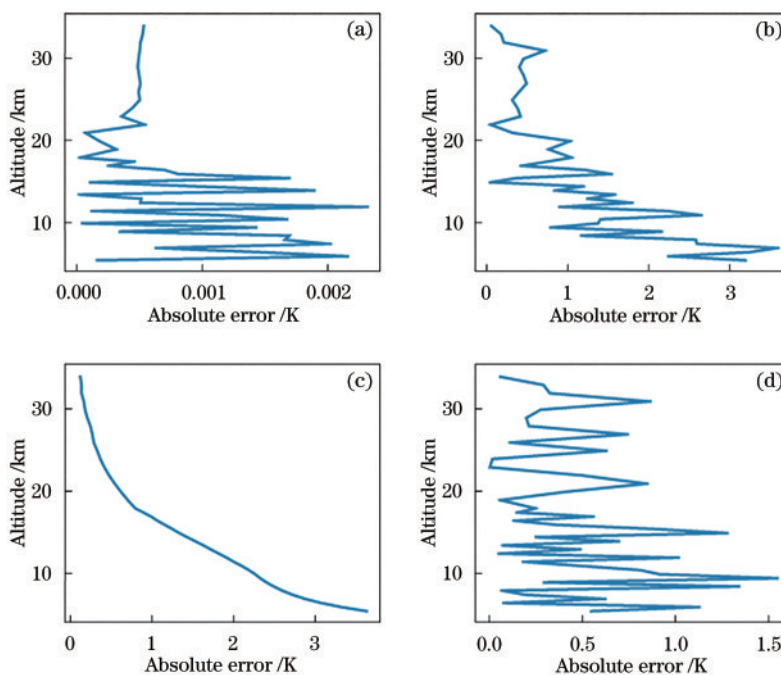


图 7 不同条件下温度反演绝对误差。(a)无压强误差和差分吸收系数反演误差;(b)仅压强反演误差;(c)仅差分吸收系数反演误差;(d)同时有压强反演误差和差分吸收系数反演误差

Fig. 7 Absolute error of inversion temperature at different conditions. (a) Without inversion error of pressure and differential absorption coefficient; (b) with only inversion error of pressure; (c) with only inversion error of differential absorption coefficient; (d) with both inversion error of pressure and differential absorption coefficient

去除压强误差和差分吸收系数误差时,温度反演误差大致在 0.002 K 范围内变化,无明显规律,如图 7(a)所示;存在压强反演误差时,温度反演误差在 20 km 以下呈逐渐增大趋势,伴随着振荡,至 5 km 处最大约为 3.5 K,如图 7(b)所示;存在差分吸收系数误差时,温度反演误差在 20 km 以下逐渐增大,至 5 km 处最大约为 4 K,如图 7(c)所示;同时存在压强反演误差和差分吸收系数反演误差时,温度反演误差的整体变化趋势是增大的,表现为分别只有压强反演误差和差分吸收系数反演误差时对应温度反演误差的叠加,如图 7(d)所示。

由图 7 中不同条件下温度反演结果可知,温度反演误差主要受压强反演误差和差分吸收系数反

演误差的影响。反演得到的压强存在反演误差,差分吸收系数也存在反演误差,误差因子为  $\gamma$ ,反演得到差分吸收系数与模型值关系为  $k' = \gamma k$ ,因为图 6(b)中呈现的是绝对误差,所以为正值,而实际的仿真结果为  $k' < k$ ,则有  $0 < \gamma < 1$ ,故利用(8)式求解温度也存在误差。

将(6)式代入(8)式可得

$$T_{i+1} = \frac{c_2 E''}{c_2 E''/T + \ln[p'T^2 f_i / (\gamma p T_i^2 f)]}, \quad (10)$$

其中  $T$ 、 $p$  和  $f$  可认为是对应参数在模型中的“真实值”。

为了表达压强反演误差与差分吸收系数误差对温度迭代结果的影响,将(10)式改为

$$T_{i+1} = \frac{c_2 E''}{c_2 E''/T + \ln[T^2 f_i / (T_i^2 f)] + \ln(p'/p) - \ln \gamma}. \quad (11)$$

因为压强反演误差随高度降低呈增大趋势,且  $p' < p$ ,则  $\ln(p'/p) < 0$ ,所以当只有压强反演误差时,根据(11)式可知温度迭代结果相对真实值偏大。因为压强相对误差随高度降低呈增大趋势,所以温度误差随高度降低也呈增大趋势。

因为  $0 < \gamma < 1$ ,则  $\ln \gamma < 0$ ,所以当只有差分吸收系数误差时,根据(11)式可知温度迭代结果相对真实值偏小。又因为随高度下降差分吸收系数反演误差因子  $\gamma$  减小,所以对应温度迭代结果相对真实值的误差增大。

上述两方面因素造成的温度迭代结果误差方向相反,部分相互抵消,最终误差控制在 1.5 K 范围内,整体偏小。

### 3.3 无差分吸收系数反演误差时的温度、压强反演结果

本研究以反演得到的压强作为条件,在去除差分吸收系数反演误差条件下,以迭代计算得到的压强值对温度进行迭代求解,然后将求解得到的温度值反过来对压强进行循环求解。

在进行压强的迭代求解过程中,给定的温度估计值为模型温度添加  $-10 \sim 10$  K 范围内随机误差后的值,压强迭代结果如图 5(b)所示;以此压强结果对温度进行求解,温度反演结果如图 8(a)所示,最大误差约为 1 K;然后将此温度反演结果重新代入到压强迭代计算过程中,计算得到压强的最大误差约 0.3%,如图 8(b)所示。

仿真实验显示,加上差分吸收系数反演误差

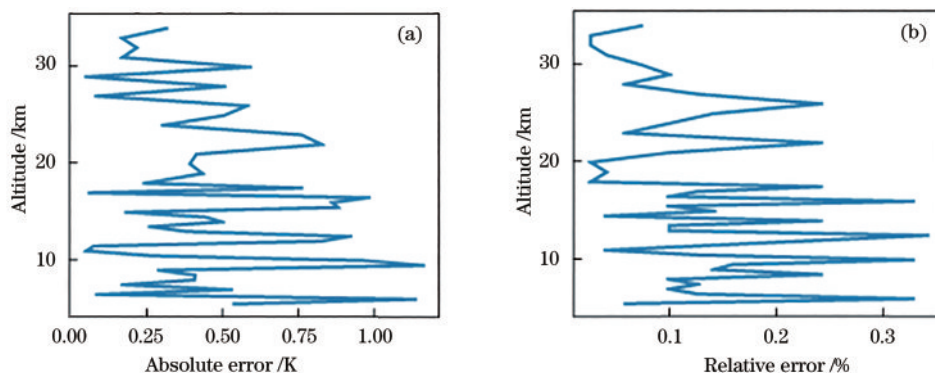


图 8 无差分吸收系数反演误差时的温度、压强反演结果。(a)温度反演结果;(b)循环 1 次的压强反演结果

Fig. 8 Temperature and pressure inversion results without differential absorption coefficient inversion error. (a) Temperature inversion results; (b) pressure inversion results of cycle 1

时,以上述循环求解方式提高压强和温度精度的方法行不通,这是因为差分吸收系数反演误差改变了参数“真实值”之间原本的数量关系。对于压强反演,图 5(c)为只有差分吸收系数误差时对应的压强反演结果,图 5(d)为同时有差分吸收系数误差和温度估计误差时对应的压强反演结果,两种条件下反演得到的误差廓线变化趋势基本一致。对于图 5(d)中的情形,温度的影响只是在图 5(c)的结果上叠加了约 2% 的波动,温度估计误差相对于差分吸收系数误差对反演结果整体变化的影响不大,所以也难以通过循环求解得到更高精度的温度,难以以此方式提高压强精度。

## 4 结 论

针对激光掩星探测大气对流层中上层到平流层下层高度范围内压强和温度的反演方法进行了研究和仿真分析。利用差分波长方法对反演原理进行仿真分析,结果显示,压强反演误差主要受差分吸收系数反演误差的影响,误差随高度下降而呈不断增大的趋势,最大误差约为 6%。温度反演误差主要受压强和差分吸收系数反演误差的影响,两种影响部分抵消,最大误差为 1.5 K。在去除差分吸收系数反演误差的条件下,对压强和温度进行 1 次循环求解,得到压强反演最大误差约为 0.3%,温度反演最大误差约为 1 K;而在加上差分吸收系数反演误差时,以迭代循环方法减小压强和温度反演误差的方法行不通,所以在利用掩星数据进行反演时,为进一步减小压强和温度反演误差,应该在减小差分吸收系数反演误差的方向上努力。

## 参 考 文 献

- [1] Schweitzer S, Kirchengast G, Schwarz M, et al. Thermodynamic state retrieval from microwave occultation data and performance analysis based on end-to-end simulations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D10): D10301.
- [2] Jensen A S, Lohmann M S, Benzon H H, et al. Full spectrum inversion of radio occultation signals [J]. *Radio Science*, 2003, 38(3): 1040.
- [3] Kursinski E R, Syndergaard S, Flittner D, et al. A microwave occultation observing system to characterize atmospheric water, temperature, and geopotential via absorption [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(12): 1897-1914.
- [4] You F. Research on the inter-satellite differential lidar detection method of near space temperature and pressure profiles in occultation mode [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. 游峰. 基于掩星模式的临近空间大气温压廓线的星间差分吸收激光探测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [5] Proschek V, Kirchengast G, Schweitzer S. Greenhouse gas profiling by infrared-laser and microwave occultation: retrieval algorithm and demonstration results from end-to-end simulations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2011, 4(2): 2273-2328.
- [6] Li W D, Liu J Q, Zhu Y D, et al. LEO-LEO infrared laser occultation technique to measure atmospheric carbon dioxide concentration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0810001. 李文冬, 刘继桥, 朱亚丹, 等. LEO-LEO 红外激光掩星 CO<sub>2</sub> 浓度测量技术研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0810001.
- [7] Hong G L, Li H, Wang Y N, et al. Number simulation for laser occultation measurement of atmospheric vapor mixing ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0401001. 洪光烈, 李虎, 王一楠, 等. 激光掩星探测大气水汽混合比的数值模拟 [J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0401001.
- [8] Singer S F. Measurement of atmospheric surface pressure with a satellite-borne laser [J]. *Applied Optics*, 1968, 7(6): 1125-1127.
- [10] Mitchell R M, O'Brien D M. Error estimates for passive satellite measurement of surface pressure using absorption in the A band of oxygen [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44(15): 1981-1990.
- [11] Korb C L, Weng C Y. A theoretical study of a two-wavelength lidar technique for the measurement of atmospheric temperature profiles [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, 21(9): 1346-1355.
- [12] Theopold F A, Bösenberg J. Differential absorption lidar measurements of atmospheric temperature profiles: theory and experiment [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1993, 10(2): 165-179.
- [13] 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.
- [14] Riris H, Numata K, Li S, et al. Airborne measurements of atmospheric methane column abundance using a pulsed integrated-path differential absorption lidar[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(34): 8296-8305.
- [15] Sun M C, Tu C, Hu X, et al. Preliminary application of stellar occultation in the near-space[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0909001.  
孙明晨, 涂翠, 胡雄, 等. 临近空间星光掩星技术的初步应用[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(9): 0909001.
- [16] Xu L, Zhang Z R, Dong F Z, et al. Analytical method of spectral overlapping interference using laser absorption spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 193003.  
许丽, 张志荣, 董凤忠, 等. 激光吸收光谱中谱线重叠干扰的解析方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 193003.
- [17] Hoke M L, Shaw J H. Atmospheric temperature profiles and ray paths from occultation spectra[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(9): 1309-1312.
- [18] Repasky K S, Bunn C E, Hayman M, et al. Modeling the performance of a diode laser-based (DLB) micro-pulse differential absorption lidar (MPD) for temperature profiling in the lower troposphere[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33543-33563.