

## 基于激光外差技术的高分辨率整层大气透过率测量

吴庆川<sup>1,2</sup>, 黄印博<sup>1</sup>, 谈图<sup>1</sup>, 曹振松<sup>1\*</sup>, 刘强<sup>1</sup>, 高晓明<sup>1</sup>, 饶瑞中<sup>1</sup>

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽合肥 230031  
2. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽合肥 230026

**摘要** 激光外差技术是一种高灵敏度的光谱探测技术, 利用该技术研制的装置易于集成化小型化, 可以进行地基或星载的地球大气或天文观测。基于激光外差光谱测量技术, 结合自研的太阳跟踪仪建立了一套高分辨率整层大气透过率测量系统, 系统分辨率约为  $0.006 \text{ cm}^{-1}$ 。该系统利用太阳光和红外激光在非线性探测器中进行光学混频, 通过对获取的混频信号进行电子学滤波和平方率探测, 获得了高光谱分辨率的外差信号。采用 Langley-plot 定标法对测量系统进行定标, 获取了仪器标定常数和对应的大气总光学厚度, 实现了中红外波段整层大气透过率的实时测量。同时, 将实测整层大气透过率与 MODTRAN5.0 软件仿真计算的结果进行对比分析, 两者的一致性较好。分析表明该测量系统具有很高的分辨率并且性能稳定可靠, 在大气科学、天文观测和激光大气传输等研究领域具有广阔的应用前景。

**关键词** 光谱; 激光外差; 整层大气透过率; Langley-Plot 定标

中图分类号: O433.5 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)06-1678-05

### 引言

整层大气透过率在大气辐射、地球资源遥感、空气质量监测、空间目标监测等领域是一个重要的大气参数<sup>[1-2]</sup>。目前获取整层大气透过率的方法多依赖于 Lowtran 和 Modtran 等计算软件。然而, 不同地区地面条件各异, 并且大气系统复杂多变, 仅依靠模式软件计算很难精确地获取整层大气透过率的实时变化, 特别是模式计算的结果还依赖于分子吸收谱线参数数据库, 如 HITRAN2012 数据库。该数据库对分子吸收等相关科学研究方面起着不可替代的参考与指导意义, 但也存在部分谱线参数冗余以及部分谱线参数缺失的问题, 低温低压下的谱线参数大多为理论计算结果, 未经实验验证, 使得基于谱线参数结合模式仿真计算的结果存在不确定性, 例如, 在  $2\sim 5 \mu\text{m}$  波段, 初始高度为 1 km 时不同版本的计算结果最大绝对偏差接近 40%<sup>[3]</sup>。

鉴于上述原因, 研究人员希望开展整层大气透过率直接测量的技术研究, 詹杰等<sup>[4]</sup>研制了昼夜兼用型可见光波段整层大气透过率测量仪器, 实现了从  $350\sim 700 \text{ nm}$  波段分辨率为 50nm 的整层大气透过率测量; 李建玉等<sup>[5]</sup>研制了便携式全自动太阳光度计使用八个带宽 10 nm 的滤光片实现同时探

测 1 050, 940, 860, 780, 670, 610, 520 和 400 nm 共八个波段的太阳直接辐射强度; 臧寿洪等<sup>[6]</sup>提出在实际测量时用分段测量和对比计算的方法实现了红外波段大气透过率的测量。上述这些研究解决了可见光到近红外波段的整层大气透过率的测量, 但高光谱分辨率、中红外波段的整层大气透过率的测量却鲜有报道。

近年来, 基于激光外差技术的太阳透过整层大气的高分辨率光谱测量工作引起了研究人员的极大兴趣, 该技术具有高光谱分辨率, 并可利用该高分辨率光谱数据反演被测气体的廓线分布和整层大气透过率。美国航空航天局哥达德太空飞行中心激光遥感实验室的 Wilson 等<sup>[7]</sup>使用以分布反馈式 (DFB) 半导体二极管激光器为本振光源的激光外差系统测量了  $\text{CO}_2$  在  $1.573 \mu\text{m}$  附近的吸收光谱; 法国科学院大气分子光谱研究组的 Parvitte 等<sup>[8]</sup>使用以外腔量子级联激光器 (QCL) 为本振光源的激光外差系统, 测量了大气中臭氧在  $9 \mu\text{m}$  附近的吸收光谱, 并讨论了与使用  $\text{CO}_2$  气体激光器为本振光源的差别; 英国卢瑟福实验室空间科学与技术部的 Weidamnn 等<sup>[9-11]</sup>将该系统应用于大气探测中, 同时测量了实际大气中  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  共五种气体的垂直廓线分布。以上所述研究内容均为利用激光外差技术获得太阳透过整层大气的高分辨率光谱, 并利用光谱对大气中的

收稿日期: 2016-09-06, 修订日期: 2016-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41205021), 国家(863计划)和中国科学院青年创新促进会(2015264)资助

作者简介: 吴庆川, 1990年生, 中国科学技术大学硕士研究生 e-mail: wu1221@mail.ustc.edu.cn

\*通讯联系人 e-mail: zsciao@aiofm.ac.cn

一种或多种气体的廓线分布进行反演，并未对中红外整层大气透过率进行相关研究。

本实验室谈图等在国内首次报道了以窄线宽 4.4 μm 外腔量子级联激光器作为本地振荡光源，黑体作为辐射光源的激光外差光谱实验装置，并开展了不同压力下二氧化碳气体激光外差光谱测量<sup>[12]</sup>。在此基础上，本文结合自研的太阳跟踪装置建立了基于激光外差技术的整层大气透过率测量系统，该系统利用太阳光和红外激光在非线性探测器中进行光学混频，通过对获取的混频信号进行电子学滤波和平方率探测，获得了高光谱分辨率的外差信号。同时，利用建立的激光外差系统开展了 4.497 μm 波段整层大气透过率的实时测量，并与 MODTRAN5.0 模式计算结果进行了对比分析。综上所述，外差探测技术具有很高的光谱分辨率，选择不同的本振光源及相应的外差探测器可以探测多个波段的光谱信息，相对于其它探测技术具有更高的灵敏度。

### 1 整层大气透过率测量原理

激光外差是利用本振激光与被测信号光经合束器后在探测器光敏面产生相干性，由快速光电探测器进行响应，实现光学混频<sup>[13]</sup>。信号依次经过低通中频滤波器、平方律特性探测器、带通滤波器处理后，滤掉光学混频信号中的高频信息和噪声较大的低频信息，仅保留中频信息，该中频信号可在百兆赫兹以内，与此对应的光谱分辨率优于 0.01 cm<sup>-1</sup>。

相比于传统的太阳辐射计对太阳功率的直接测量，激光外差系统具有高光谱分辨率以及高空间分辨率<sup>[12-14]</sup>，并且通过改变本振激光源的波长和选取不同波段外差探测器，实现多个波段的高分辨整层大气透过率的测量。

通常假设大气由若干层平行平面组成，在某一给定位置，根据比尔-朗伯定律可知，激光外差系统在地面上测量到的波长为 λ 的直接太阳辐射的辐照度 P(λ) 可表示为

$$P(\lambda) = P_0(\lambda) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \exp[-m(\theta)\tau(\lambda)] \quad (1)$$

其中，P<sub>0</sub>(λ) 是对应于大气层顶的太阳辐照度的系统测量值，(d<sub>0</sub>/d)<sup>2</sup> 是日-地距离修正因子，用来修正大气上界太阳直射辐照度，m(θ) 是沿天顶角 θ 的光路上的相对大气质量，τ(λ) 是波长为 λ 的指向天顶方向的大气光学厚度。大气斜程透过率为

$$T(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{P_0(\lambda) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2} \quad (2)$$

对式(2)两边取对数得

$$\ln \left[ \frac{P(\lambda)}{\left(\frac{d_0}{d}\right)^2} \right] = \ln P_0(\lambda) - m(\theta)\tau(\lambda) \quad (3)$$

以大气质量 m(θ) 为自变量，ln[P(λ)/(d<sub>0</sub>/d)<sup>2</sup>] 为变量在直角坐标系中作图，若 τ(λ) 不变则得到一条直线，截距为 lnP<sub>0</sub>(λ)，斜率为 τ(λ) 即光学厚度，其中截距是利用最小二乘法线性拟合并外推得到的。

激光外差系统用 Langley-plot 定标方法进行定标，得到该系统的 P<sub>0</sub>(λ)，在大气稳定、气溶胶含量较小的天气条件

下，测量不同时刻(不同大气质量)的 P(λ)，根据式(3)进行拟合，将拟合直线外推得到截距 lnP<sub>0</sub>(λ)。实际测量时，只需把某一时刻激光外差系统测量的 P(λ) 代入式(2)就可以计算出该时刻的大气透过率，具体的标定流程可参见文献<sup>[15]</sup>。

### 2 整层大气透过率测量系统

激光外差装置如图 1 所示，实验中使用的本振光源是外腔反馈式量子级联激光器，激光器输出线宽在 1 s 的积分时间内小于 10 MHz。激光输出波长在 2 201~2 283 cm<sup>-1</sup> 范围内，可实现连续无跳模扫描。太阳跟踪仪收集到的太阳光经过斩波器斩波，与本振光在合束镜(50%R:50%T)上合束，合束后的光束经过 ZnSe 聚焦透镜(焦距为 25 mm)聚焦在高速光电探测器上(响应带宽为 0~100 MHz)，太阳光和本振光在探测器上混频得到的信号经过射频滤波器(带宽 B 根据系统噪声水平调整)滤波后到达射频功率探测器，功率探测器得到的信号送入锁相放大器，对信号进行解调，从而得到外差吸收光谱信号。

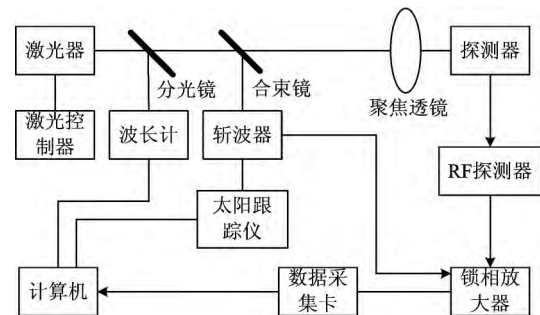


图 1 激光外差系统实验装置图

Fig 1 Experimental set-up of laser heterodyne instrument

太阳跟踪仪是整层大气透过率测量系统的重要组成部分，用于实时跟踪太阳收集太阳光，收集到的太阳光经过反射镜送入激光外差装置中。太阳跟踪仪的整体结构如图 2 所示，跟踪仪采取的是太阳运动轨迹跟踪方式和光电跟踪方式相结合的混合跟踪方式，并利用 Labview 软件编写的程序进行图像采集及计算控制。

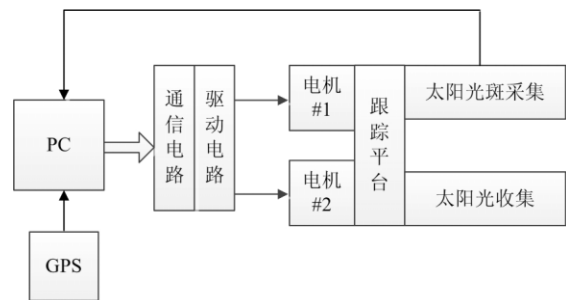


图 2 太阳跟踪仪原理结构图

Fig 2 The principle sketch of solar tracker

#### 2.1 光路布局

激光外差信号的产生对光路的要求较为严苛，需要严格

的共线并垂直入射到外差探测器上才能获取信噪比理想的信号。图 3 是信号光与本振光混频的光路布局图。把激光器、合束镜、聚焦透镜、探测器固定在同一条光路上，太阳跟踪仪收集到的太阳光通过反射镜 1、2 导入实验光路，经过调试，使太阳光和本振光很好的共线，这是实现高灵敏外差探测的基础。

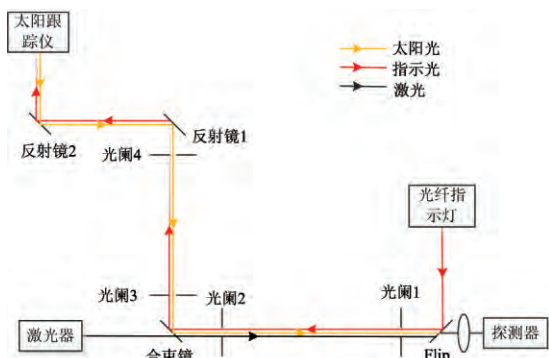


图 3 光路布局图

Fig 3 The layout of light path

### 2.2 外差信号提取及其处理方法

实验时，函数发生器输出设定为频率为 0.5 Hz，扫描振幅为 2 V 的正弦波，加载到激光控制器上扫描激光器。激光器的输入电流为 430 mA，温度为 17 °C。激光器产生的本振光与太阳跟踪装置捕获的太阳光经合束镜合束，汇聚到外差探测器上进行探测。实验中选用的是 10 MHz 高通滤波器，结合探测器本身的响应带宽(0~100 MHz)，总的滤波带宽 B 为 90 MHz(10~100 MHz)，因此系统的光谱分辨率为  $2B^{[13]}$ ，即 180 MHz( $0.006 \text{ cm}^{-1}$ )。该 90 MHz 宽带内的拍频信号经过射频功率探测器转换成正比于功率的信号送入锁相放大器。斩波器的频率设定为 1.7 kHz，锁相放大器的积分时间常数设定为 1 s，灵敏度设定为  $10 \mu\text{V}$ ，解调外差探测器产生的周期性变化信号。锁相放大器输出的外差信号经过 200 次平均由数据采集卡提取。本振光波长用波长计(Bristol 621A)进行测量，并利用 Labview 编写的程序进行实时记录。获取的原始数据要进一步处理，采集到的外差值减去背景值求出系统探测的外差值；然后根据式(2)反演获取大气透过率。

### 3 测量结果及讨论

经过调试和多次优化光路后，选择大气环境稳定，晴朗无云，气溶胶含量较低的天气情况下对测量系统进行定标。如图 4 所示，以大气质量  $m$  为自变量， $\ln[P(\lambda)/(d_0/d)^2]$  为变量在直角坐标系中作图，可以得到一副散点图，利用非线性最小二乘线性回归对该数据进行拟合，可得到线性回归的截距  $\ln P_0(\lambda)$  (对应为系统标定常数)以及斜率(对应大气总光学厚度)。由图可知，激光外差大气透过率测量系统的现场标定常数为 1.741，对应的大气总光学厚度为 0.372。

根据定标结果，激光外差大气透过率测量系统实测的整层大气透过率如图 5 所示。横坐标为测量时间，纵坐标为对

应的大气透过率。可以看出该天实测的整层透过率随着太阳仰角的减小而降低，该时段内透过率的变化范围为 0.14~0.46，平均透过率为 0.320，标准偏差为 0.106。

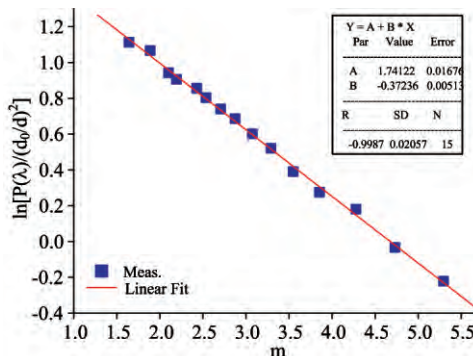


图 4 测量的外差信号值与大气质量之间的关系

Fig 4 Variation of  $\ln[P(\lambda)/(d_0/d)^2]$  versus air mass

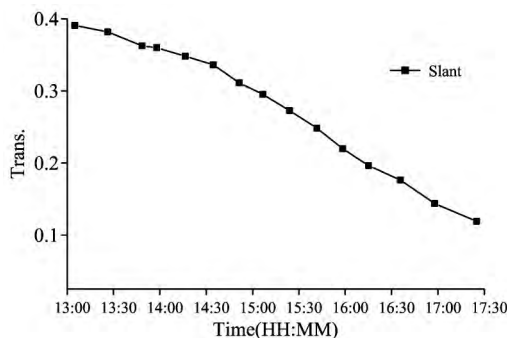


图 5 激光外差实测的整层大气透过率

Fig 5 Field measurement of total atmospheric transmittance

由实测结果换算为垂直上行传输整层透过率的变化范围为 0.47~0.51，其平均透过率为 0.489，标准偏差为 0.011。大气参数测量结合模式仿真分析计算的整层透过率的变化范围为 0.55~0.59，其平均透过率为 0.566，标准偏差为 0.011。相对激光外差技术实测的整层透过率而言，测量结合模式法计算的透过率与实测透过率偏差不超过 15%，最小

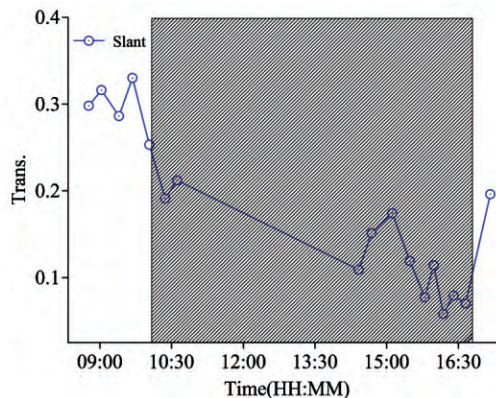


图 6 有云时实测的整层大气透过率

Fig 6 Field measurement of total atmospheric transmittance when it is cloudy

相对偏差为 5.7%，最大相对偏差为 14.5%。

通过以上分析可知激光外差系统实测结果与 MODTRAN5.0 模式计算结果一致性较好。然而，在部分天气，特别是天空中有云的情况下，实测的整层大气透过率与模式计算分析的透过率存在较大的差异，图 6 给出了在测量期间天气变化较大情况下实测的整层大气透过率。开始测量时天气晴好，上午时段高空出现薄云(10:00—17:00 图中阴影部分所示)，在这种天气下测量的透过率明显偏小且起伏较大，由此可见云对整层透过率有很大影响，后续将着重开展与之相关的研究工作。

## 4 结 论

激光外差探测技术具有高分辨率、高灵敏度、体积小等

优点，是进行高分辨率光谱测量的强有力手段。本文介绍了实验室自行建立的基于激光外差技术的整层大气透过率测量系统并对该系统进行了定标，该系统具有放大微弱信号、高光谱分辨率的优点。利用该系统进行实际测量，首次获得了 4.497  $\mu\text{m}$  波段高光谱分辨率的整层大气透过率，并与 MODTRAN5.0 模式计算的透过率进行了对比分析，两者一致性较好，验证了测量系统的可行性，证明了激光外差技术在大气探测方面的优势和潜力，后续将在系统探测灵敏度、光谱分辨率以及云对整层大气传输效率的影响等方面继续开展研究工作。

## References

- [1] ZHU Ming, ZHAN Jie(朱 明, 詹 杰). High Power Laser and Particle Beams(强激光与粒子束), 2010, 22: 2843.
- [2] LU Yuan, LING Yong-shun(路 远, 凌永顺). Infrared Technology(红外技术), 2003, 25: 45.
- [3] LIU Dan-dan, HUANG Yin-bo, DAI Cong-ming, et al(刘丹丹, 黄印博, 戴聪明, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2013, 42: 1776.
- [4] ZHAN Jie, GUO Rui-peng, HUANG Hong-hua, et al(詹 杰, 郭瑞鹏, 黄宏华, 等). High Power Laser and Particle Beams(强激光与粒子束), 2007, 19: 1761.
- [5] LI Jian-yu, XU Wen-qing, QIE Li-li, et al(李建玉, 徐文清, 伽丽丽, 等). Optical Technique(光学技术), 2012, 38: 30.
- [6] ZANG Shou-hong, BAI Yun-ta, OUYANG Yi(臧寿洪, 白云塔, 欧阳艺). Infrared(红外), 2009, 30: 26.
- [7] Wilson E L, McIinden M L, Miller J H, et al. Applied Physics B, 2013, 114: 385.
- [8] Parvitte B, Joly L, Zéninari V, Courtois D. Spectrochimica Acta Part A-Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2004, 60: 3285.
- [9] Weidmann D, Reburn W J, Smith K M. Review of Scientific Instruments, 2007, 78: 073107-1.
- [10] Weidmann D, Reburn W J, Smith K M. Applied Optics, 2007, 46: 7162.
- [11] Tsai T R, Rose R A, Weidmann D, et al. Applied Optics, 2012, 51: 8779.
- [12] TAN Tu, CAO Zhen-song, WANG Gui-shi, et al(谈 图, 曹振松, 王贵师, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2015, 35(6): 1516.
- [13] Parvitte B, Zéninari V, Thiébeaux C, et al. Spectrochimica Acta Part A, 2004, 60: 1193.
- [14] ZUO Bao-jun, ZHANG Ai-hong(左宝军, 张爱红). Journal of Harbin Institute of Technology(哈尔滨工业大学学报), 2001, 33: 655.
- [15] GUO Rui-peng, ZHAN Jie, RAO Rui-zhong (郭瑞鹏, 詹 杰, 饶瑞中). Chinese Journal of Quantum Electronics(量子电子学报), 2006, 23: 736.

# High-Resolution Atmospheric-Transmission Measurement with a Laser Heterodyne Radiometer

WU Qing-chuan<sup>1, 2</sup>, HUANG Yin-bo<sup>1</sup>, TAN Tu<sup>1</sup>, CAO Zhen-song<sup>1\*</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>, GAO Xiao-ming<sup>1</sup>, RAO Rui-zhong<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Abstract** Laser heterodyne technology is a highly sensitive laser spectroscopy technique which can be integrated. It has the potential to develop a compact ground or satellite based radiometer for Earth observation and astronomy. Based on the laser heterodyne technology, a set of high resolution laser heterodyne detection system was established together with a solar tracker. The spectral resolution of the system is about 0.006  $\text{cm}^{-1}$ . Sunlight is superimposed with infrared laser light in a nonlinear detector. The signals pass through an electronics filter and a square-law detector, then the high-resolution heterodyne signal is extracted.

In terms of the field measurement, Langley-Plot Calibration method was used to calibrate the system first, then total atmosphere transmittance of mid-infrared was measured. The calibration constant and corresponding to the atmospheric total optical thickness were presented. According to the comparison between the results of heterodyne measurement system and that of software MORTRAN5.0 calculation, good agreement was obtained. It is shown that the system has high spectral resolution which can be applied to atmospheric transmittance measurement. Besides, the system also shows potential applications in atmospheric sciences, astronomy, laser propagation through the atmosphere and other areas.

**Keywords** Spectroscopy; Laser heterodyne; Total atmospheric transmittance; Langley-plot

(Received Sep. 6, 2016; accepted Dec. 28, 2016)

\* Corresponding author