

文章编号 1004-924X(2024)21-3157-09

船载激光外差温室气体探测系统研制

吴兰艳^{1,2}, 杨晨光^{1*}, 邓昊³, 李仁仕³, 杨清宇¹, 阚瑞峰³

(1. 中国科学院 深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572000;

2. 中国科学院大学, 北京 101408;

3. 中国科学院 合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:针对海洋大气温室气体柱浓度的探测需求,研制了一套适合于船载平台应用的 1.57 μm 近红外激光外差辐射探测系统。通过低成本监控云台的图像跟踪算法简化图像处理与控制算法,降低算法延时,实现船载动平台的稳定太阳跟踪。提出了本振光温度阶梯调谐的激光外差测量方法减小跟踪误差影响的同时降低非散粒噪声,提高测量信噪比。南海海上实验表明,该系统实测最大跟踪误差为 1.98 mrad,满足激光外差探测需求;同时,实现了走航与漂航过程中大气二氧化碳柱浓度的连续监测,测量结果波动小于 $\pm 1.0 \times 10^{-6}$,波动范围仅为传统本振光电流调谐的 1/12。该系统为海洋大气本底温室气体柱浓度探测提供了重要的技术支撑。

关键词:激光外差;船载探测;二氧化碳柱浓度;本振光温度调谐

中图分类号: O433.1; O657.38 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243221.3157

Development of shipborne laser heterodyne greenhouse gas detection system

WU Lanyan^{1,2}, YANG Chenguang^{1*}, DENG Hao³, LI Renshi³, YANG Qingyu¹, KAN Ruifeng³

(1. Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

3. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

* Corresponding author, E-mail: yangcg@idsse.ac.cn

Abstract: In response to the need for detecting column concentrations of greenhouse gases in the marine atmosphere, a 1.57 μm near-infrared laser heterodyne radiometric detection system suitable for shipborne platforms was developed. An image tracking algorithm was developed based on a low-cost surveillance pan-tilt system. The algorithm delay was reduced by simplifying the image processing and control algorithms. This enabled stable solar tracking on a shipborne dynamic platform. A measurement method with local oscillator laser temperature step tuning was proposed. This reduces the impact of tracking errors and non-shot noise, thereby improving the signal-to-noise ratio of the measurements. Sea trials were conducted in the South China Sea using the system, and the maximum measured tracking error was 1.98 mrad,

收稿日期: 2024-10-12; 修订日期: 2024-11-06.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (No. 42105129); 国家自然科学基金面上项目 (No. 62475267); 中国科学院青年交叉团队 (No. JCTD-2022-14)

meeting the requirements for laser heterodyne detection. Continuous monitoring of atmospheric CO₂ column concentration was achieved during both cruising and drifting modes. The fluctuation in the measured CO₂ column concentration was less than $\pm 1.0 \times 10^{-6}$, reducing the fluctuation range to 1/12 of that observed with traditional local oscillator laser current tuning. This system provides the technical means for subsequent detection of background greenhouse gas column concentrations in the marine atmosphere.

Key words: laser heterodyne; shipborne detection; CO₂ column concentration; local oscillator laser temperature tuning

1 引言

海洋和大气是地球系统的重要组成部分,两者之间的相互作用在很大程度上决定了全球和区域的气候和环境变化。海-气相互作用在二氧化碳等温室气体的全球收支中扮演着重要角色^[1-2]。海洋大气边界层的温室气体测量对精确分析全球温室气体循环过程,定量理解海洋在全球气候变化中的作用具有重要意义^[3-4]。目前,海洋大气边界层的温室气体探测主要以船载点式观测^[5]与卫星遥感^[6]为主。原位探测虽然精度与时间分辨率都较高,但无法准确反映区域大气层整体的温室气体浓度;卫星遥感具有覆盖面大的优势,可直接测量全球温室气体的柱浓度分布,但卫星观测结果对地表浓度变化不敏感,而且数据精度受下垫面反射率的影响较大,需要利用地基观测数据进行比对和校准。高分辨率傅里叶变换红外光谱技术(FTS)通过测量太阳辐射的高分辨率大气吸收光谱,可实现高精度的温室气体地基遥感^[7],但因其体积大、质量重及需要隔振等限制,它仅能部署在有限的地面站,无法满足船载应用需求。因此,目前尚缺乏用于海洋大气温室气体遥感的船载技术与装备。

激光外差辐射光谱探测技术作为一种红外波段高分辨、高灵敏的辐射光谱探测手段,已成功应用于地外行星大气遥测^[8]、系外天体光谱观测^[9]等领域。随着半导体激光技术的成熟,该技术在波长选择范围、体积与集成化水平等方面取得了显著进展,并实现了基于本振光连续无跳模波长调谐的探测模式。美国国家航空航天局(NASA)Wilson等率先开发便携式近红外激光外差大气温室气体柱浓度观测系统^[10]。英国卢

瑟福实验室(RAL)Weidmann等在中红外激光外差温室气体柱浓度与廓线观测方面进行了长期研究^[11-12]。中国科学院安徽光机所高晓明课题组开发了多套激光外差温室气体遥测系统,在城市与农田区域温室气体排放通量研究中得到了实际应用^[13-17]。阚瑞峰团队在近红外激光外差技术研究中,率先采用信号光放大技术,显著提高了测量信噪比^[18-21]。然而,由于缺乏低成本快响应的太阳跟踪计,目前的激光外差大气温室气体探测系统多基于陆地固定平台,国外星载稳定轨道平台的相关系统尚处于论证与研制阶段^[22],未见船载或车载非稳定平台系统的公开报道。

针对于远海大气温室气体遥感探测需求,本文利用低成本防抖云台,研制了一套船载近红外激光外差大气温室气体探测系统,通过低延时图像追踪算法结合本振光温度调谐探测方式,实现走航与漂航过程中大气二氧化碳柱浓度的高精度观测。

2 原理

激光外差辐射探测技术是通过高功率的本振激光对热辐射中近似同频的窄带光信号进行放大,再通过本振光波长调谐的方式,扫描获得特定的单根或连续光谱。

待探测的热辐射信号 E_s 与本振激光信号 E_{LO} 分别表示为:

$$E_s = \int_0^{\infty} A(\omega_s) \cos(\omega_s t) d\omega_s, \quad (1)$$

$$E_{LO} = A_{LO} \cos(\omega_{LO} t), \quad (2)$$

其中: ω_s 为热辐射信号频率, $A(\omega_s)$ 为热辐射在 ω_s 频率上的幅值, ω_{LO} 为本振激光频率, A_{LO} 为本振激光幅值。

混频后,在光电探测器上转换成光电流信号 $\langle i \rangle^2$,即:

$$\begin{aligned} \langle i \rangle^2 &= \eta(E_s + E_{LO})^2 = \\ &= \frac{1}{2} \eta A_{LO}^2 + \frac{1}{2} \int_0^\infty \eta A(\omega_s)^2 d\omega_s + \\ &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \eta A_{LO} A(\omega_s) \cos[(\omega_{LO} - \omega_s)t] d\omega_s + o = \\ &= \langle i_{DC} \rangle^2 + \langle i_{AC} \rangle^2, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 η 为探测器响应系数。光电流信号包含直流分量 $\langle i_{DC} \rangle^2$ 与交流分量 $\langle i_{AC} \rangle^2$ 两部分。其中,直流分量由本振光强与热辐射光强的直流响应组成;交流分量包含频率为 $\omega_{LO} - \omega_s$,幅值为本振光与热辐射幅值乘积的差频信号,以及包含热辐射不同频率信号间差频的小量 o 。由于本振光信号远高于热辐射信号,小量 o 通常被忽略。

光电探测器通过带通滤波器获得以本振激光频率为中心频率的上下限分别为 ω_H 与 ω_L 的中频信号 $\langle i_{IF} \rangle^2$:

$$\langle i_{IF} \rangle^2 = \frac{1}{2} \int_{\omega_L}^{\omega_H} \eta A_{LO} A_{\omega_s} \cos[(\omega_{LO} - \omega_s)t] d\omega_s. \quad (4)$$

最后通过平方率探测器,从中频信号中检出低频振幅 $\langle i_{SQ} \rangle^2$:

$$\langle i_{SQ} \rangle^2 = \frac{1}{2} \eta A_{LO} \int_{\omega_L}^{\omega_H} A(\omega_s) d\omega_s. \quad (5)$$

最终获得的信号强度与本振光强度,本振激光频率附近中频带宽内热辐射强度的积分成正比。

激光外差辐射探测的主要噪声包括:散粒噪声、约翰逊噪声、本振光过量噪声和相干探测热噪声。其中,散粒噪声与光电流、探测带宽成正比,是制约外差探测灵敏度的关键。约翰逊噪声是由混频器、中频放大器的电子元件造成的热噪声,在足够高的本振光功率条件下,相对于散粒噪声可以忽略不计。本振光过量噪声是由本振光的强度、相位以及模式波动造成的,在高本振光功率条件下,可以忽略其影响。相干探测热噪声来自于接收系统视场中热源的温度波动。文献[23]详细分析了基于散粒噪声与相干探测热噪声的激光外差信噪比。

总之,在高本振光功率条件下,散粒噪声与相干探测热噪声起主导作用。然而,在低本振光功率条件下,约翰逊噪声与本振光过量噪声却不

可忽略。因此,高晓明团队使用EDFA辅助放大本振光功率,从而达到散粒噪声主导的效果。本文采用更低成本的温度调谐方式,在恒定电流条件下通过温度调谐方式,实现整个扫描范围内本振光功率的近似不变,同样达到提高信噪比的效果。

3 实验装置与方法

3.1 外差实验装置

本文研制的车载激光外差光谱测量系统结构及实物如图1所示,主要包含太阳跟踪、外差光路与信号调理采集三个部分。

首先,利用太阳跟踪仪实时跟踪太阳的位置,确保光路的稳定性和测量的连续性。太阳跟踪仪安装在位于船舶甲板的支架上,在倾摇环境中精确捕捉太阳的运动轨迹,并通过光纤准直器(THORLABS, RC08FC-P01)对太阳光进行采集。光纤准直器的视场与太阳跟踪仪保持一致,使得系统能够有效收集太阳光信号,并耦合到单模光纤中。太阳光经9:1光纤分束器(LBTEK, SMC-1550-10-FA)分为二束,其中90%通过光开关作为信号光,另10%接入光电探测器监测太阳光强度变化。

为了提高外差信号的信噪比,采用光开关(BATI, FOS3200-3333)对太阳光进行强度调制。经过调制的信号光首先通过光隔离器(LBTEK, FOI-1550-FA-0.3W),避免端面反射光回到光开关中产生同频干扰。再使用光放大器(THORLABS, BOA1080S)放大信号光,提高信噪比。放大后的光信号通过光学滤波器(飞宇光纤, 10240710040017),减少光放大器带来的散粒噪声。系统采用分布式反馈可调谐半导体激光器(NEL, NLK1L5EAAA)作为本振光。本振激光器发射的激光束经过光衰减器衰减至合适的强度,随后通过1:1的光纤合束器(Newport, F-CPL-F-12155-FCAPC)与太阳光进行合束。两束光在1.6 GHz带宽的高速光电探测器(武汉光谷互连, MBD-1.6G-A)的光敏面上混频,产生外差信号。通过中频滤波器(Mini-Circuits, ZABP-141-S+)滤波,再使用肖特基二极管(Herrotek, DZR124AA)进行射频功率检测,最后将信号送入锁相放大器(Liquid Instruments,

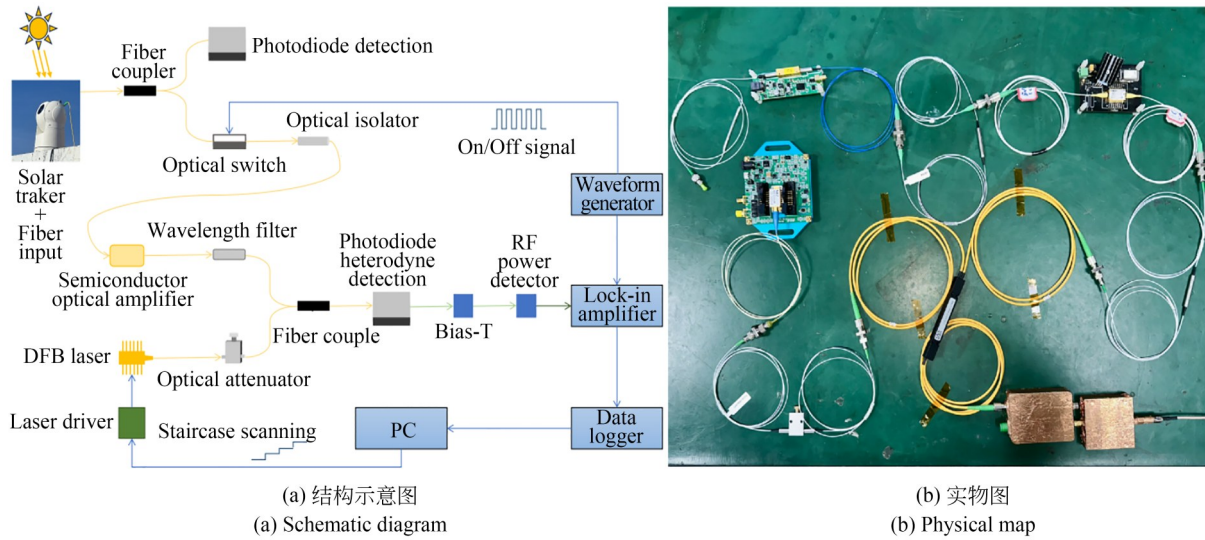


图 1 船载激光外差光谱测量系统

Fig. 1 Shipborne laser heterodyne radiometer

Moku:Pro)做相关性解调与数据采集,将采集到的光谱数据传输至计算机中进行处理和分析。

3.2 太阳跟踪算法

在预算有限的条件下,为实现船载动平台稳定的太阳跟踪与光谱采集,本文对成都鼎信精控科技生产的双轴防抖云台进行改造并重新编写控制算法。该云台内嵌陀螺仪,可以根据陀螺仪的反馈信号调整云台俯仰角,保证太阳在监控画面内。在此基础上,通过机械改造将光纤准直器安装于摄像头上方,并使用二维调整架使它与摄像头同光轴。

控制算法流程如图 2 所示,通过图像处理获得太阳质心坐标,调整云台的方位角和俯仰角,实现稳定船载跟踪与光谱采集。太阳跟踪的第一步是从相机中获取实时的图像帧。本文采用多媒体视频处理工具 FFmpeg 来拉取视频流,并直接进行图像帧的解码。相比于 OpenCV,直接调用 FFmpeg 能够更快速地解码视频流,并减少延迟。在相同的硬件条件下,其图像延迟较 OpenCV 约降低 60%。

由于太阳在图像中的亮度远高于其他背景物体,利用这一特征对太阳进行检测和定位。首先对图像进行灰度化处理,简化处理步骤,并减少计算开销。接着,对灰度图像进行二值化处理,将亮度高于设定阈值的像素标记为白色(即前景,表示太阳的区域),其余像素标记为黑色

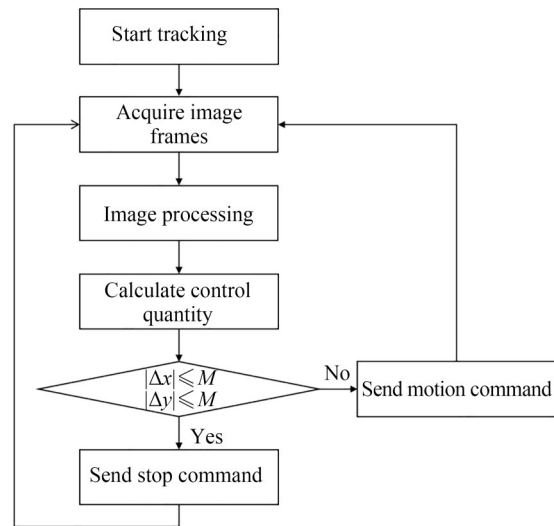


图 2 太阳跟踪算法流程

Fig. 2 Flowchart of solar tracking algorithm

(即背景),从而在二值图像中突出显示太阳轮廓。

在二值化图像中,对前景区域进行轮廓检测,使用几何矩(Moments)方法计算该轮廓的质心,其中一阶矩(M_{10} 和 M_{01})与零阶矩(M_{00})的比值即为质心的坐标位置,具体计算公式如下:

$$X_{\text{sun}} = \frac{M_{10}}{M_{00}}; Y_{\text{sun}} = \frac{M_{01}}{M_{00}}, \quad (6)$$

式中: X_{sun} 为太阳质心的横坐标, Y_{sun} 为纵坐标。

为了实现实时跟踪,将太阳质心坐标($X_{\text{sun}}, Y_{\text{sun}}$)与图像中心坐标($X_{\text{center}}, Y_{\text{center}}$)进行比

较,计算两者之间的偏差。根据坐标偏差控制云台的运动,使太阳质心逐渐回到图像的中心位置。具体而言,当偏差值较大时,快速转动电机,使太阳迅速进入视场中心区域;当偏差较小时,调节幅度也相应减小,以避免系统过度调节或产生振荡现象。当偏差大于设定值 M 时,发送运动指令;反之,云台则无需调整。通过这种闭环控制,云台可以始终对准太阳的位置,确保光纤准直器能够持续有效地收集太阳光。

3.3 本振光温度调谐探测技术

在以往的激光外差大气探测中,通常采用锯齿波电流连续扫描的方式对本振激光的波长进行调谐,以获取太阳的吸收光谱。为获得高的信噪比,本振光的波长扫描周期通常为 $1\sim 10\text{ s}$,再通过 $50\sim 200$ 次平均获得理想的测量结果。在陆地静止平台上,太阳相对于跟踪设备的运动速度非常慢,配合四象限探测器或图像探测技术,可以准确地跟踪太阳中心,采用该方法能够实现光谱的高精度测量。在船载动平台上,由于船的倾摇频率通常为亚赫兹量级,与本振光的调谐频率接近,跟踪精度的下降会严重影响观测信噪比。

为了解决该问题,本文采用本振激光波长阶梯调谐的方法,对激光器的温度进行阶梯式调谐,结合对太阳光强度的实时检测,剔除太阳光强度的不稳定信号,再将阶梯内的数据做平均,获得该本振光波长点的外差信号,最终获得太阳辐射的大气吸收光谱,如图3所示。这种调谐方式减少了对稳定光束输入的依赖,适应了船载动平台的环境变化,且温度调谐过程中,本振光功率变化较小,可以进一步降低约翰逊噪声等的影响,提高信噪比。

为确定单个阶梯的测量时间,在单一温度工

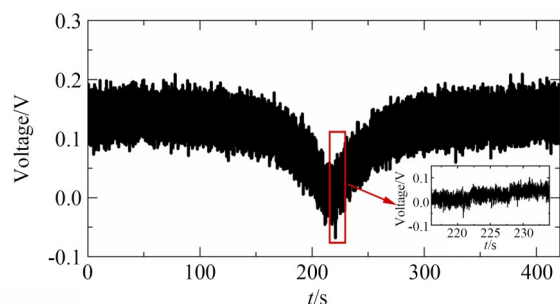


图3 温度调谐原始测量光谱

Fig. 3 Raw measurement spectrum with temperature tuning

作点测量外差光谱信号,使用艾伦方差分析系统噪声,结果如图4所示。

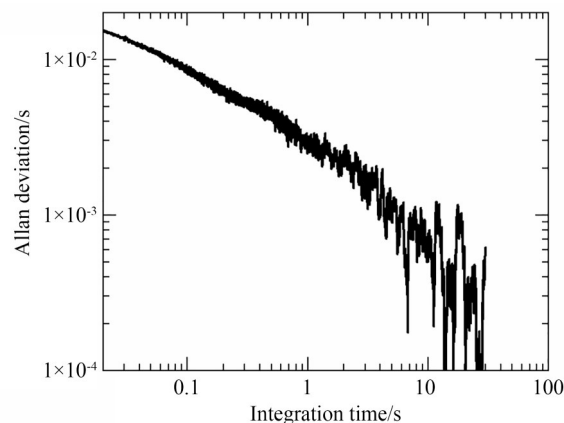


图4 温度调谐系统噪声的艾伦方差分析

Fig. 4 Allan deviation analysis of temperature tuning system noise

艾伦方差在 5 s 以内随着积分时间逐渐减小。考虑温度调谐的稳定时间,单个阶梯的测量时间设为 6 s ,取后 5 s 测量结果进行平均。选取 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一个温度台阶,使用波长计(横河机电AQ6150)与FP标准具结合的方式确定温度调谐的波长响应,调谐范围为 $6\,360.879\sim 6\,361.605\text{ cm}^{-1}$,共测量70个温度点,完成一个完整的 CO_2 吸收峰调谐,单次测量耗时 7 min 。

4 实验结果分析

在中国科学院深海科学与工程研究所组织的TS2-39-3南海科考航次中,激光外差辐射探测系统搭载在“探索二号”科考船上,在走航(平均船速 11 节 , 20 km/h)与漂航(到达目标海域开始执行科考任务,未开启动力定位)过程中开展船载整层二氧化碳柱浓度观测实验。观测过程中,海况较好,平均风力3级(微风, $0.6\sim 1.0\text{ m/s}$),平均浪高 $0.1\sim 0.5\text{ m}$ (2级,小浪)。

4.1 船载平台太阳跟踪计跟踪效果

本文使用反射型光纤准直器作为太阳光收集器,其数值孔径NA为 0.15 ,反射焦距为 33 mm ,有效接收口径为 8.6 mm ,使用的 $1\,550\text{ nm}$ 波段单模光纤的模场直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$,可收集的太阳光发散角为 0.3 mrad 。太阳对地张

角约为 9.3 mrad , 根据太阳张角与准直器接收角的冗余, 计算得到太阳跟踪计的对准要求为 $\pm 4.35 \text{ mrad}$ 。

为测试太阳跟踪仪的性能, 在 2024 年 9 月 27 日走航观测过程中, 连续记录一段时间太阳光斑的中心位置, 并根据太阳直径对应的像素尺寸, 转化为对日跟踪的对准精度, 结果如图 5 所示。X 方向最大变动值为 1.82 mrad , Y 方向最大变动值为 1.98 mrad , 满足 $\pm 4.35 \text{ mrad}$ 的对准要求。

4.2 二氧化碳柱浓度探测结果

2024 年 9 月 27 日走航过程中, 在上午 (10 点至 12 点)、下午 (12 点至 14 点) 分别采用传统的电流三角波调谐与温度阶梯调谐进行对比观测实验。获得的吸收光谱信号经过基线校正后, 根据测量位置经纬度与太阳高度角, 结合 1976 年标准美国大气模型的压力廓线与美国国家环境预报中心 (NCEP) 再分析数据的温度廓线以及二氧化碳浓度先验廓线, 采用最优估算法 (OEM), 拟合获得大气二氧化碳的柱浓度^[20]。

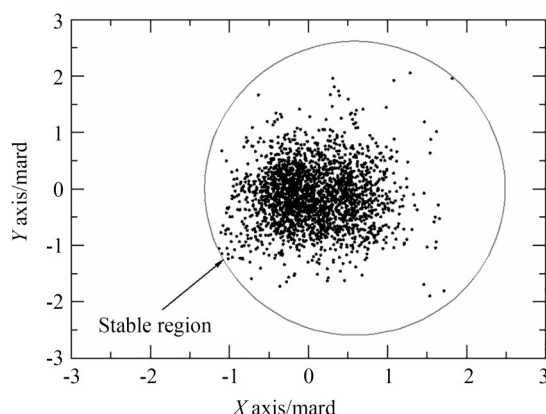


图 5 走航过程中太阳跟踪误差

Fig. 5 Solar tracking error during cruising

光谱拟合结果如图 6 所示, 采用温度阶梯调谐测量结果的拟合残差在 ± 0.025 以内, 小于传统的电流调谐的拟合残差 (± 0.05), 而且残差的随机波动明显变小。拟合残差主要是由于温度、压力以及二氧化碳先验廓线的不准确造成的。

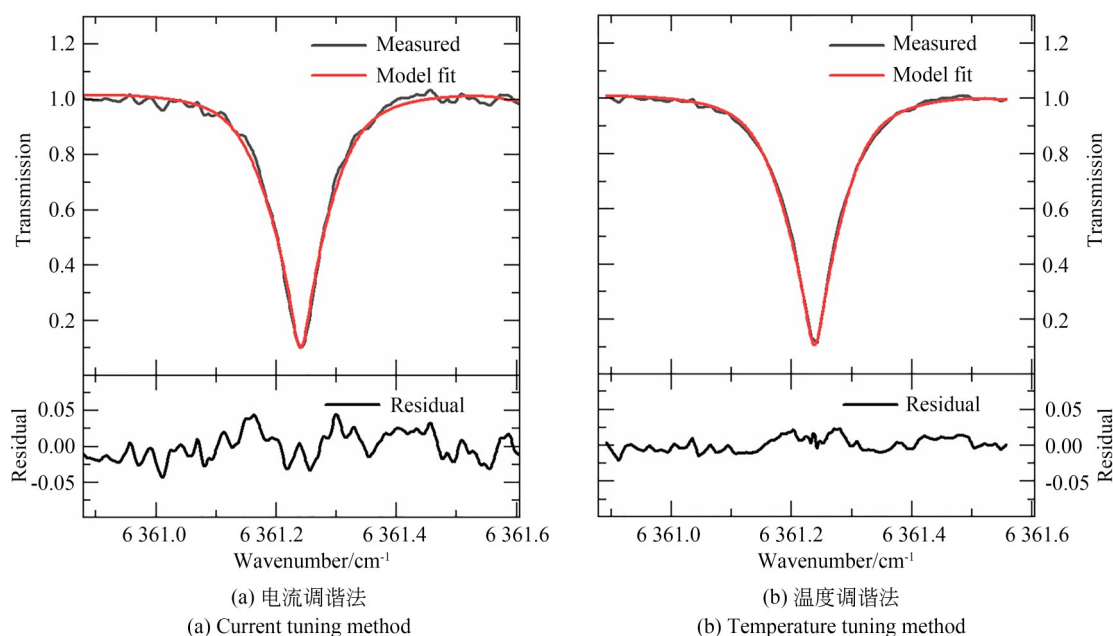


图 6 整层大气 CO_2 外差光谱拟合结果及拟合残差

Fig. 6 Fitting results and residuals of total atmospheric CO_2 heterodyne spectrum

2024 年 9 月 27 日全天的二氧化碳柱浓度观测结果如图 7 所示, 可以明显看出两种测量方式的精度差距。传统的电流调谐方式上午半天测

量的标准差为 $\pm 12.5 \times 10^{-6}$, 温度调谐方式下午半天测量的标准差为 $\pm 1.0 \times 10^{-6}$ 。

考虑到两者的积分时间不同, 对传统电流调

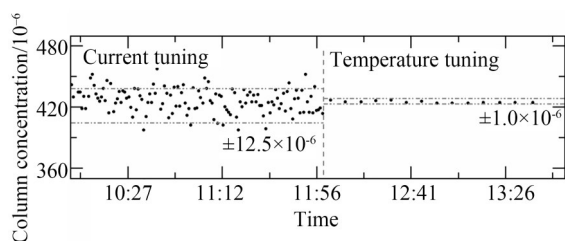


图7 南海区域2024年9月27日CO₂柱浓度测量结果
Fig. 7 Calculated CO₂ column concentration in South China Sea on September 27, 2024

谐方式的测量结果做艾伦方差分析,结果如图8所示。电流调谐测量的艾伦方差在10 min内随着积分时间的增加呈减小趋势,其最小值仍远大于温度调谐测量的标准差。

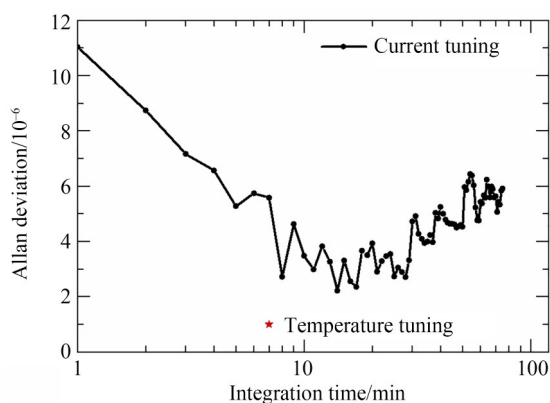


图8 电流调谐测量结果的艾伦方差分析
Fig. 8 Allan deviation analysis of measurement results by current tuning method

2024年9月28日漂航状态下,采用温度阶梯调谐方式进行全天观测,结果如图9所示。海水作为巨大的碳汇,能调节水体中生物呼吸作用与光合作用造成的二氧化碳浓度变化,因此,在日间观测过程中未观察到明显的二氧化碳浓度变化,仅在午后浓度略微上升。

与27日的走航观察结果相比,28日二氧化碳柱浓度测量结果低了约 9×10^{-6} 。由于搭载的

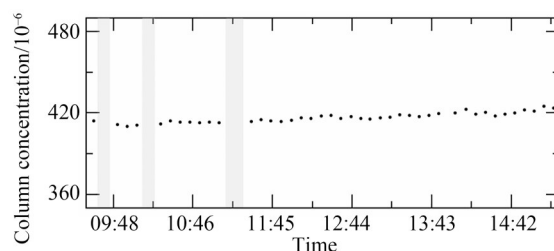


图9 南海区域2024年9月28日CO₂柱浓度测量结果(灰色区域太阳被云遮挡,无法测量)
Fig. 9 Calculated CO₂ column concentration in South China Sea on September 28, 2024 (The gray area indicates that the sun was obscured by clouds, making measurement impossible)

“探索二号”科考船烟道位于船头驾驶台上方,在走航过程中的排放会持续影响柱浓度测量光路上的二氧化碳浓度,且在走航过程中船二氧化碳排放量也远大于漂航状态。由于近地面的二氧化碳浓度对于整层柱浓度的贡献较大,推测船二氧化碳排放污染是造成二氧化碳柱浓度测量结果偏高且不一致的原因。

5 结 论

本文搭建了一套近红外激光外差二氧化碳柱浓度探测系统。该系统采用低成本监控云台,通过降低算法延时实现船载动平台稳定太阳跟踪,在3级风力11节船速走航过程中,最大跟踪误差为1.98 mrad,满足激光外差探测需求。采用本振光温度阶梯调谐方式减小跟踪误差,提高测量信噪比。在南海开展海上实验,实现了走航与漂航过程中大气二氧化碳柱浓度的连续监测,测量结果波动小于 $\pm 1.0 \times 10^{-6}$,波动范围降至传统本振光电流调谐的1/12。未来将进一步优化太阳跟踪计的安装位置,屏蔽船排放对测量结果的影响,实现海洋大气本底二氧化碳柱浓度的准确测量。

参考文献:

[1] HOEGH-GULDBERG O, BRUNO J F. The impact of climate change on the world's marine ecosystems[J]. *Science*, 2010, 328(5985): 1523-1528.

[2] CODISPOTI L A. Interesting times for marine N₂O [J]. *Science*, 2010, 327(5971): 1339-1340.
[3] ZHUANG Q, MELILLO J M, MCGUIRE A D, et al. Net emissions of CH₄ and CO₂ in Alaska: implications for the region's greenhouse gas budget[J].

- Ecological Applications*, 2007, 17(1): 203-212.
- [4] ROBERTS C M, O'LEARY B C, MCCAULEY D J, *et al.* Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(24): 6167-6175.
- [5] HELFTER C, MULLINGER N, VIENO M, *et al.* Country-scale greenhouse gas budgets using ship-borne measurements: a case study for the UK and Ireland[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(5): 3043-3063.
- [6] SCHNEISING O, BERGAMASCHI P, BOVENS-MANN H, *et al.* Atmospheric greenhouse gases retrieved from SCIAMACHY: comparison to ground-based FTS measurements and model results[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(3): 1527-1540.
- [7] WUNCH D, TOON G C, HEDELIUS J K, *et al.* Quantifying the loss of processed natural gas within California's South Coast Air Basin using long-term measurements of ethane and methane[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(22): 14091-14105.
- [8] NAKAGAWA H, AOKI S, SAGAWA H, *et al.* IR heterodyne spectrometer MILAH1 for continuous monitoring observatory of Martian and Venusian atmospheres at Mt. Haleakalā, Hawaii[J]. *Planetary and Space Science*, 2016, 126: 34-48.
- [9] KRABBE A, MEHLERT D, RÖSER H P, *et al.* SOFIA, an airborne observatory for infrared astronomy[J]. *European Journal of Physics*, 2013, 34(6): S161-S177.
- [10] WILSON E L, DIGREGORIO A J, VILLANUEVA G, *et al.* A portable miniaturized laser heterodyne radiometer (mini-LHR) for remote measurements of column CH₄ and CO₂[J]. *Applied Physics B, Lasers and Optics*, 2019, 125(211): 11.
- [11] HOFFMANN A, HUEBNER M, MACLEOD N, *et al.* Spectrally resolved thermal emission of atmospheric gases measured by laser heterodyne spectrometry[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3810-3813.
- [12] ROBINSON I, BUTCHER H L, MACLEOD N A, *et al.* Hollow waveguide-miniaturized quantum cascade laser heterodyne spectro-radiometer[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2299-2308.
- [13] SHEN F J, HU X Y, LU J, *et al.* Design of an all hollow fiber-coupled middle infrared laser heterodyne radiometer (LHR)[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2023, 65(5): 1324-1330.
- [14] LI J, XUE Z Y, LI Y, *et al.* Real-time measurement of atmospheric CO₂, CH₄ and N₂O above rice fields based on laser heterodyne radiometers (LHR)[J]. *Agronomy*, 2023, 13(2): 373.
- [15] LI J, XUE Z Y, *et al.* Erbium-doped fiber amplifier (EDFA)-assisted laser heterodyne radiometer (LHR) working in the shot-noise-dominated regime[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(20): 5229.
- [16] WANG J J, TU T, ZHANG F, *et al.* External-cavity diode laser-based near-infrared broadband laser heterodyne radiometer for remote sensing of atmospheric CO₂[J]. *Optics Express*, 2023, 31(6): 9251-9263.
- [17] SHEN F J, HU X Y, LU J, *et al.* Performance characterization of a fully transportable mid-infrared laser heterodyne radiometer (LHR)[J]. *Sensors*, 2023, 23(2): 978.
- [18] DENG H, LI M X, HE Y B, *et al.* Laser heterodyne spectroradiometer assisted by self-calibrated wavelength modulation spectroscopy for atmospheric CO₂ column absorption measurements[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 230: 118071.
- [19] DENG H, YANG C G, XU Z Y, *et al.* Development of a laser heterodyne spectroradiometer for high-resolution measurements of CO₂, CH₄, H₂O and O₂ in the atmospheric column[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2003-2013.
- [20] DENG H, LI R S, LIU H, *et al.* Optical amplification enables a huge sensitivity improvement to laser heterodyne radiometers for high-resolution measurements of atmospheric gases[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(17): 4335-4338.
- [21] 李仁仕, 邓昊, 金谷雨, 等. 本振激光强度调制激光外差光谱遥测技术研究[J]. *环境工程*, 2023, 41(10): 9-13.
- LI R S, DENG H, JIN G Y, *et al.* Research on laser heterodyne spectrum telemetry technology based on local oscillator laser intensity modulation[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(10): 9-13. (in Chinese)
- [22] ZENEVICH S, GAZIZOV I S, SPIRIDONOV

M V, *et al.* IVOLGA: a high-resolution heterodyne near-infrared spectroradiometer for Doppler studies of Venus atmospheric dynamics [C]. *Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications VII*. April 3-May 16, 2022.

Strasbourg, France. SPIE, 2022: 52.

- [23] PARVITTE B, ZÉNINARI V, THIÉBEAUX C, *et al.* Infrared laser heterodyne systems [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2004, 60(5): 1193-1213.

作者简介:



吴兰艳(1997—),女,广西河池人,硕士研究生,2020年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事激光光谱技术与控制算法方面的研究。E-mail: wuly@idsse.ac.cn

通讯作者:



杨晨光(1986—),男,安徽安庆人,高级工程师,2008年、2013年于华中科技大学分别获得学士和博士学位,主要从事光谱技术与海洋传感探测设备的研发。E-mail: yangcg@idsse.ac.cn