

# 本振光功率锁定方法应用于激光外差辐射计的研究\*

李月<sup>1)2)</sup> 李竣<sup>1)2)</sup> 薛正跃<sup>1)2)</sup> 王晶晶<sup>2)</sup> 王贵师<sup>2)</sup> 高晓明<sup>1)2)</sup> 谈图<sup>2)†</sup><sup>1)</sup> (中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 合肥 230026)<sup>2)</sup> (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, 合肥 230031)

(2023 年 2 月 22 日收到; 2023 年 3 月 13 日收到修改稿)

激光外差辐射计具备成本低、体积小、光谱分辨率高等优势, 可扩展现有的地面碳测量网络, 验证卫星观测结果, 并能在卫星观测区域外提供数据覆盖. 本文在现有的激光外差辐射计的基础上, 报道了基于掺铒光纤放大器的可实现本振光功率锁定的近红外激光外差辐射计原型机. 该激光外差辐射计利用一个中心波长为  $1.603\ \mu\text{m}$  的分布反馈式半导体激光器作为本振光源, 采用掺铒光纤放大器放大本振光功率, 并利用自动功率控制电路实现掺铒光纤放大器输出端光功率的锁定, 消除了由本振光功率变化引起的基线斜率, 从而实现免基线拟合的整层大气透过率谱的测量. 详细评估了基于掺铒光纤放大器的高度集成化的激光外差辐射计的仪器性能, 并在合肥市科学岛 ( $31.9^\circ\text{N}$ ,  $117.2^\circ\text{E}$ ) 地区进行了整层大气  $\text{CO}_2$  透过率谱的测量. 在一天的测量时间内得到 6 组大气  $\text{CO}_2$  透过率谱, 与大气辐射模型模拟结果进行比对, 测量结果一致. 实验结果表明, 掺铒光纤放大器的应用可以提高激光外差辐射计的性能, 优化其结构, 进而为实现无人值守的长期大气  $\text{CO}_2$  浓度观测和构建全面的碳观测网络提供仪器设备的补充.

**关键词:** 激光外差, 光学设计, 掺铒光纤放大器, 高光谱分辨率**PACS:** 32.30.Bv, 42.62.Fi, 29.30.-h, 78.47.jh**DOI:** 10.7498/aps.72.20230261

## 1 引言

工业革命以来, 化石燃料大量燃烧, 畜牧业发展, 交通工具尾气大量排放等原因导致温室气体浓度逐年升高, 全球温室气体分布整体呈上升趋势. 温室气体的大量排放导致的全球气候问题是全人类面临的重大挑战. 为此, 我国提出实现 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的重大战略部署, 为尽快实现此目标, 对大气温室气体的长期连续且精准的观测刻不容缓<sup>[1]</sup>.

地基遥感观测是大气测量温室气体柱浓度常见的方式, 傅里叶变换光谱仪是主要的地基遥感观测仪器, 如全球总碳柱观测网 (TCCON) 配备了具有高光谱分辨率的傅里叶变换光谱仪 (Bruker,

IFS125HR), 虽然它能够提供更高精度的大气温室气体柱丰度的探测, 但其尺寸大、维护成本高等不足限制了观测网络的进一步扩展. 为此, 2014 年 KIT 和 Bruker Optics 公司共同推出了一种便携式红外傅里叶变换光谱仪 EM27/SUN, 测量  $4000\text{--}11000\ \text{cm}^{-1}$  波段光谱信息以反演大气温室气体柱浓度, 为温室气体浓度的监测提供了一种新型的便捷手段, 但是其成本较高且光谱分辨率较低<sup>[2]</sup>.

自 20 世纪 70 年代以来, 激光外差光谱技术因其成本低、体积小、分辨率高等优点得到快速发展, 已广泛用于臭氧 ( $\text{O}_3$ )、水汽 ( $\text{H}_2\text{O}$ )、甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、氨 ( $\text{NH}_3$ )、一氧化氯 ( $\text{ClO}$ ) 等大气温室气体柱丰度和垂直廓线的测量<sup>[3–11]</sup>. 近年来, 伴随着小体积低功耗的分布反馈式 (distributed feedback, DFB) 半导体激光器、光纤器件及集成电路的发展, 使近

\* 国家自然科学基金 (批准号: 42075128) 和国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF1300102-1) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tantu@aiofm.ac.cn

红外激光外差辐射计集成成为了可能. 2012 年, Wilson 团队<sup>[12–14]</sup>研制了一种用于大气柱中二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 的高灵敏测量的低成本、小型化的激光外差辐射计. 最近, 俄罗斯 Zenevich 等<sup>[15]</sup>研制了具有  $0.0013\text{ cm}^{-1}$  超高光谱分辨率的多通道激光外差光谱辐射计, 用于测量大气中  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  分子吸收, 推进了外差辐射计集成的进一步发展. 国内安徽光学精密机械研究所王晶晶<sup>[16]</sup>在实验室搭建了一套可实现大气  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的透过率谱测量的全光纤近红外激光外差系统. 随后, 邓昊等<sup>[17]</sup>搭建了一套以三个分布反馈式半导体激光器作为外差探测的本振源的近红外激光外差辐射系统, 实现了对大气二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、水汽 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 和氧气 ( $\text{O}_2$ ) 柱浓度的同时测量. 最近, 安徽光学精密机械研究所曹振松课题组<sup>[18]</sup>搭建了以  $1.316\text{ }\mu\text{m}$  附近的半导体激光器作为本振源的无源光纤激光外差辐射计, 并对其参数进行优化, 并利用该外差辐射计实现了大气柱中的水汽浓度测量. 外差辐射计在测量大气中气体浓度时, 存在本振光功率变化导致基线斜率的问题, 为获得准确的大气透过率谱, 提出把激光器的功率变化作为参考的基线<sup>[10]</sup>, Honffmann 等<sup>[19]</sup>提出对测量数据进行多项式拟合以确定基线, 将多项式拟合系数作为参数代入反演中, 从而计算出信号基线.

本文报道了可实现本振光功率锁定的近红外激光外差辐射计原型机, 避免了外差探测时本振光

功率变化而导致的基线斜率问题. 利用此仪器对合肥科学岛 ( $31.9^\circ\text{N}$ ,  $117.2^\circ\text{E}$ ) 地区的大气  $\text{CO}_2$  透过率谱进行连续外差探测. 仪器原理、结构、性能评估及相应的测量结果将在下文被讨论.

## 2 仪器结构

激光外差辐射计的基本原理在文献<sup>[20]</sup>中已有详细介绍, 研制的激光外差辐射计结构示意图如图 1 所示. 外差辐射计由四个模块组成, 分别为本振光模块、信号光模块、信号处理与采集模块和电源模块.

### 2.1 本振光模块

本振光模块由激光控制器、DFB 激光器 (NEL, NLK1L5EAAA) 和掺铒光纤放大器 (梓冠光电, erbium doped fiber amplifier, EDFA) 构成. 一个中心波长为  $1.603\text{ }\mu\text{m}$ , 线宽为  $2\text{ MHz}$  的分布反馈式激光器作为外差辐射计的本振光源. 激光器输出波数受工作温度及注入电流控制, 通过采集卡输出电压改变激光器工作温度和激光器注入电流, 激光器最大调谐范围可达  $6237\text{--}6241\text{ cm}^{-1}$ , 频率稳定性可优于  $0.01\text{ cm}^{-1}$ , 满足外差辐射计激光频率稳定性要求. 如图 2 所示信号采集卡输出电压为  $-1.5\text{--}1.5\text{ V}$ , 激光器对应输出波数范围为  $6238.17\text{--}6239.32\text{ cm}^{-1}$ , 此波数范围内除  $\text{CO}_2$  外, 其他气体干扰较小.

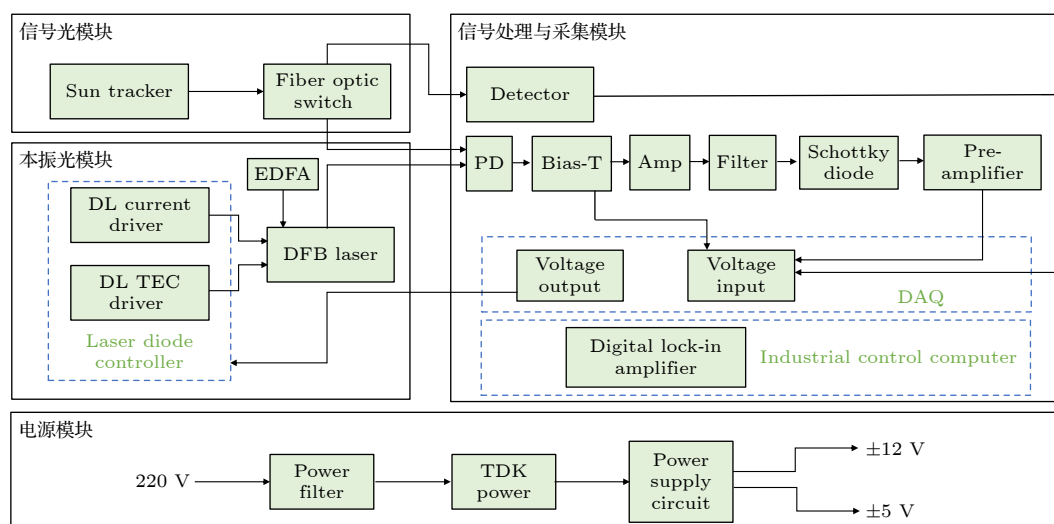


图 1 激光外差辐射计结构示意图. DL, 半导体激光器; EDFA, 掺铒光纤放大器; DFB, 分布反馈式半导体激光器; PD, 光电探测器; Amp, 放大器; Schottky diode, 肖特基二极管

Fig. 1. Structure diagram of laser heterodyne radiometer. DL, diode lasers; EDFA, erbium-doped fiber amplifier; DFB, distributed feedback; PD, photodetector; Amp, Amplifier.

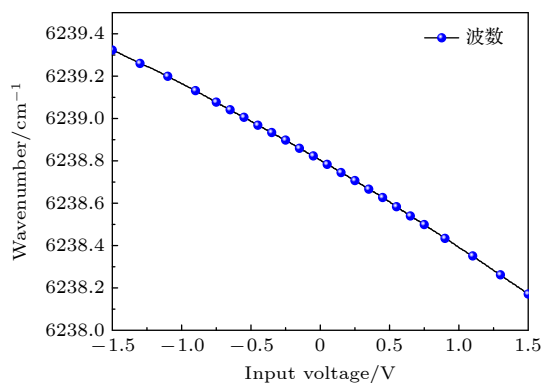


图2 不同输出电压下激光波数

Fig. 2. Laser wavenumber under different output voltages.

在扫描过程中,随着采集卡输出电压幅值变化,激光器驱动板输入到激光器的电流从 30 mA 线性增加到 80 mA,激光器输出功率从 6 mW 增加到 17 mW. 较低的本振光功率会降低外差信号的信噪比,在本振光功率较高时,外差辐射计的探测器等器件会饱和,并导致非线性基线<sup>[19]</sup>. 为使外差辐射计的电子仪器工作在线性响应范围,消除外差信号的非线性基线,提高测量的大气透过率谱的准确性,使用带功率锁定功能的 EDFA 对激光器输出光功率进行放大和锁定. EDFA 原理图及实物图分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示,其由光隔离器、掺铒光纤、波分复用器、光滤波器、激光泵浦模块及自动功率控制部分组成. 光隔离器可抑制光反射带来的影响,保证放大器的稳定性;波分复用器实现信号光与泵浦光的耦合;光滤波器可降低放大器自发辐射带来的噪声<sup>[21]</sup>;自动功率控制电路可控制输入功率稳定在特定值,避免激光泵浦模块输出功率因温度升高和使用时间增长而变化,保证测量结果的稳定性,并可实现免基线标定的整层大气透过率谱的测量. 激光外差辐射计中激光通过单模光纤传输到 EDFA 内进行放大和锁定,如图 3(c) 黑色实线所示 EDFA 输出光功率保持在 10 mW. 在实际测量过程中也可通过改变 EDFA 的增益倍数,使本振光功率与太阳光功率匹配.

## 2.2 信号光模块

信号光模块主要由太阳跟踪仪和光纤光开关构成. 实验室研制的高精度太阳跟踪仪结合太阳运动轨迹跟踪方式和光电跟踪方式实现太阳光的跟踪,跟踪精度可以达到  $4 \times 10^{-3}$  mrad. 太阳跟踪仪上的收光镜头指向太阳,采集到的太阳光被耦合到

单模光纤中,然后通过 1 分 2 光纤光开关 (Agilent CrystaLatch™ Optical Switch) 进行调制,调制频率设为 125 Hz. 经调制后的光信号一路用于外差探测,另一路经过高速放大光电探测器 (Thorlabs, PDA20CS2) 实现对太阳光强度的实时监测,高速放大光电探测器的电压输出信号被数据采集卡采集,用作后续解调的参考信号.

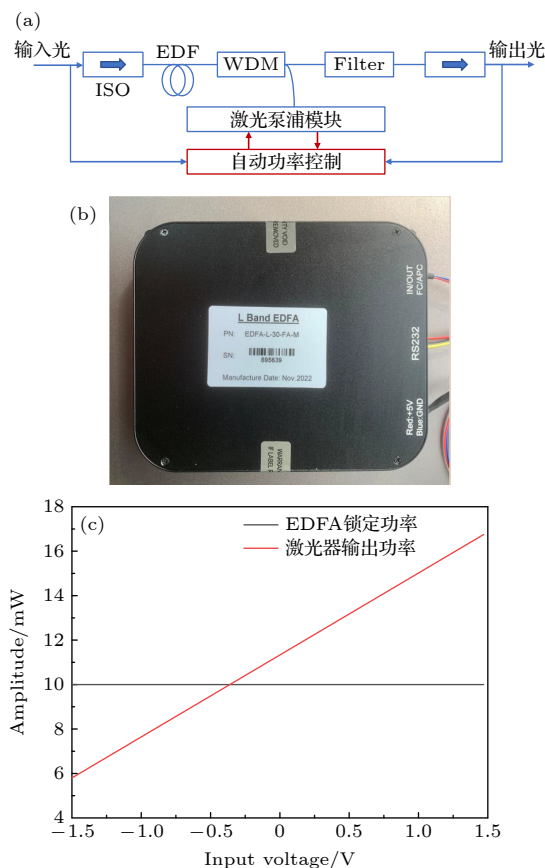


图3 EDFA 原理图、实物图及激光器输出功率变化图 (a) EDFA 原理图 (ISO, 光隔离器; EDF, 掺铒光纤; WDM, 波分复用器); (b) EDFA 实物图; (c) 激光功率 (红色实线), 经自动功率控制锁定后的 EDFA 输出功率 (黑色实线)

Fig. 3. Schematic diagram and physical diagram of EDFA, and power variation diagram of laser: (a) The schematic diagram of EDFA (ISO, isolator; EDF, erbium-doped fiber; WDM, wavelength division multiplexer); (b) the physical diagram of EDFA; (c) laser power (red solid line), output power of EDFA locked by automatic power control (black solid line).

## 2.3 信号处理与采集模块

信号处理与采集模块由光电探测器、射频元器件、工控机及采集卡构成. 本振光与太阳光在光纤合束器中准直后入射到高速光电探测器 (Thorlabs, DET08CFC/M) 表面实现光混频. Bais-Tee

(Mini-Circuits, ZFBT-6G-FT) 实现光电探测器直流信号与交流信号的分离, 其中直流信号被加载到外接电阻上形成电压信号后被采集卡采集, 交流信号即为外差信号. 三级低噪放大器 (Mini-circuits, ZX60-4016E-S+) 实现外差信号的放大. 射频滤波器 (Mini-Circuits) 用于滤除噪声. 肖特基二极管 (DHM020BB) 将射频信号转化为低频电压信号, 低频电压信号幅值较小导致较低的信噪比, 所以使用自制的前置放大器对信号进行适当的放大及滤波. 最终经过工控机内置的数字锁相程序进行解调, 得到激光外差信号.

## 2.4 电源模块

电源模块部分由电源滤波器、TDK 电源及自制的电源稳压分压电路板构成, 用于将输入的 220 V 电压转换为整个系统需要的  $\pm 12$  V 和  $\pm 5$  V 的电压源.

仪器装置实物如图 4 所示, 上部分为高精度太阳跟踪仪, 下部分为近红外激光外差辐射计主体, 主体体积为  $0.3 \text{ m} \times 0.24 \text{ m}^2$ 、重量为 15 kg.



图 4 激光外差辐射计实物图  
Fig. 4. Physical picture of laser heterodyne radiometer.

## 3 仪器性能评估

### 3.1 外差辐射计噪声分析

在激光外差辐射系统中, 主要噪声来源于探测器及放大器的暗噪声和热噪声, 激光诱导散粒噪声和激光强度噪声<sup>[22]</sup>. 为了减小噪声, 提高外差信号的信噪比, 使用频谱分析仪 (Agilent Technologies, N9000A) 对射频放大器输出信号进行频谱分析, 如图 5 所示. 黑色曲线为无信号输入情况下放大器热噪声的功率谱, 红色曲线为激光输入时功率谱, 可观察在 0—200 MHz 有较明显噪声, 这主要是由

激光器驱动电路带来的. 在 600—1000 MHz 之间存在几个峰值, 这可能会给外差信号带来额外的噪声, 所以最终使用滤波带宽为 395—520 MHz 的带通滤波器.

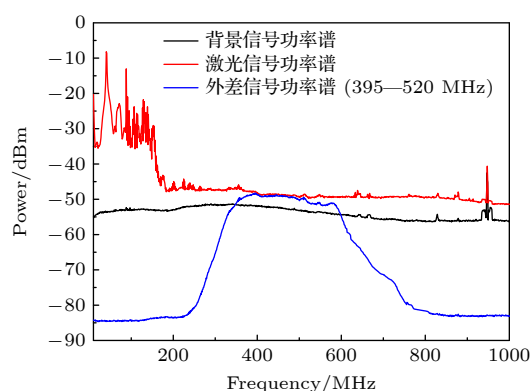


图 5 信号功率谱  
Fig. 5. Signal power spectrum.

### 3.2 外差辐射计稳定性测试

本振光波长精度是评估外差辐射计稳定性的重要参数, 图 6(a) 中红色曲线为波数的设定值, 黑色曲线为波数的实际值, 设定值与实际值偏差如图 6(b) 所示, 最大偏差为  $0.0032 \text{ cm}^{-1}$ , 稳定性满足测量要求.

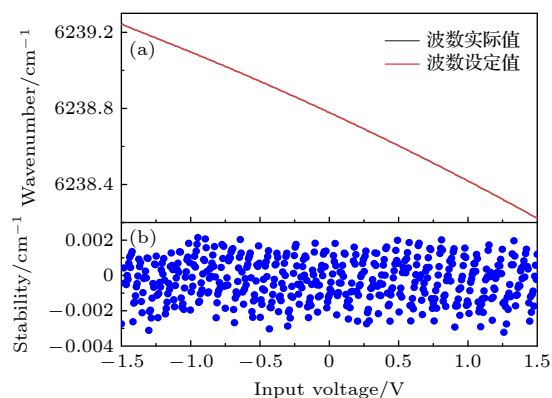


图 6 激光波数及稳定性分析 (a) 激光波数实际值 (黑色曲线) 与设定值 (红色曲线); (b) 激光波数稳定性  
Fig. 6. Laser wavenumber and stability analysis: (a) The actual value of laser wavenumber (black curve) and the set value (red curve); (b) laser wavenumber stability.

为评估外差辐射计长时间运行时的稳定性, 在实验室内以黑体为辐射源, 锁相积分时间设置为 300 ms, 连续采集了 30 min 的外差信号. 外差信号原始数据如图 7(a) 所示. 采用艾伦方差方法用于分析外差信号, 计算结果如图 7(b) 所示. 艾伦方

差表明, 该系统在 90—150 s 之间是由白噪声主导. 在 150 s 后, 漂移主导噪声统计的翻转点还没有达到. 这表明该近红外激光外差辐射计至少稳定在超过 750 s 以上. 通常一个光谱的完整获取时间约 250 s, 因此在采集时间内, 外差辐射计可以保证处于稳定状态.

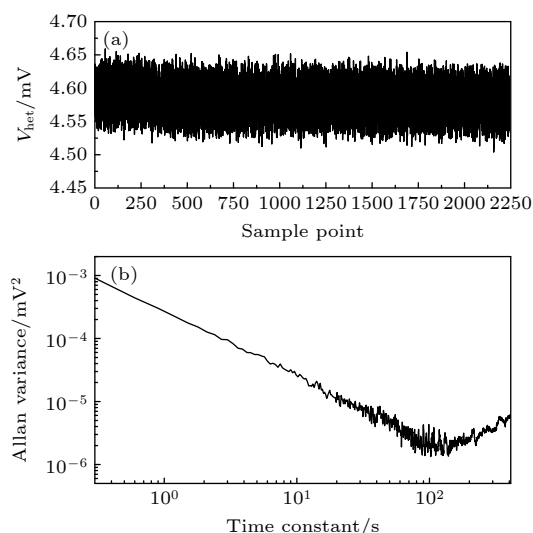


图 7 外差信号原始数据及艾伦方差曲线函数 (a) 外差信号原始数据; (b) 艾伦方差曲线函数

Fig. 7. Original data of heterodyne signal and Allen variance curve function: (a) The original data of heterodyne signal; (b) Allen variance curve function.

### 3.3 外差辐射计信号的信噪比

对于采用分布反馈激光器的激光外差辐射计, 其信噪比 (signal-to-noise, SNR) 可表示为<sup>[12]</sup>

$$\text{SNR} = \frac{2\eta_e \sqrt{B\tau} \cdot T_0}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T_{\text{BB}}}\right) - 1}, \quad (1)$$

式中,  $\eta_e$  为 InGaAs 光电二极管的量子效率 ( $\eta_e = 0.8$ ),  $B$  为滤波器带宽,  $\tau$  为等效积分时间,  $T_0$  为总传输因子 ( $T_0 = 0.3$ ),  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为频率,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T_{\text{BB}}$  为黑体的温度 ( $T_{\text{BB}} = 1273$  K). 实验中, 锁相积分时间为 300 ms, 滤波器带宽设置为 125 MHz, 理想信噪比的计算值约为 254. 保持参数不变, 分别测试有太阳光输入时的外差信号和无太阳光输入的噪声幅值. 结果如图 8 所示, 外差信号的平均幅值为 5.719 V, 噪声平均幅值为 0.057 V, 实际信噪比约为 100.

### 3.4 外差信号基线分析

在外差信号处理过程中, 外差信号除以基线得

到大气透过率谱, 反演大气透过率谱可得到气体柱浓度. 为了减小基线变化带来的影响, 本文利用带有自动功率控制电路的 EDFA 实现激光器输出功率的放大和锁定. 如图 9(a) 所示黑色曲线为未使用 EDFA 锁定本振光激光功率测量得到的外差信号, 红色曲线为 3 阶多项式拟合后得到的基线, 图 9(b) 所示黑色曲线为使用 EDFA 锁定本振光激光功率后测量得到的外差信号, 红色曲线为本振光功率锁定后的基线, 基线可以用常量表示, 避免了重新计算基线.

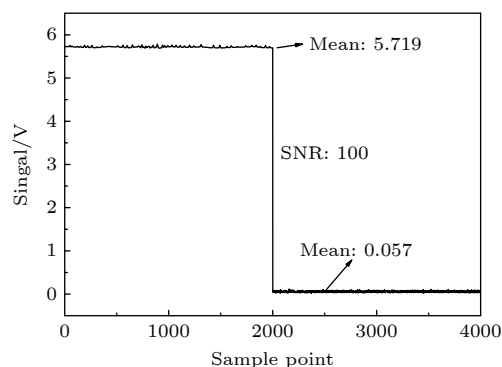


图 8 仪器装置的信噪比测量

Fig. 8. SNR measurement of instrument device.

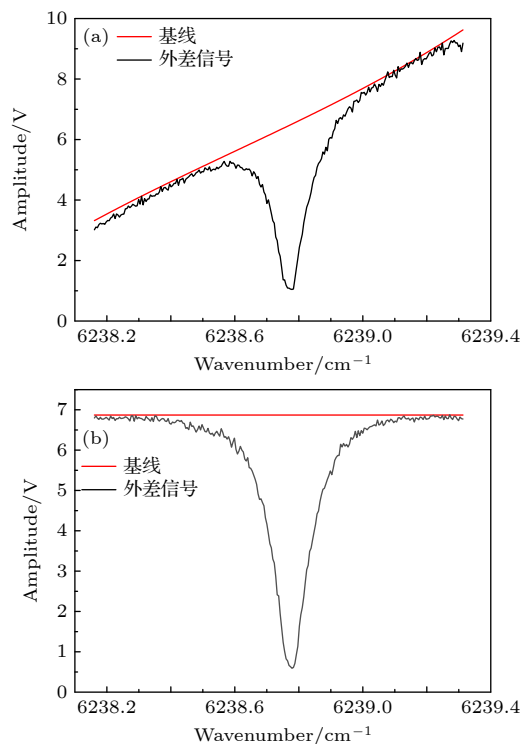


图 9 使用 EDFA 前 (a) 后 (b) 外差信号及基线变化

Fig. 9. Heterodyne signal and baseline changes before (a) and after (b) using EDFA.

## 4 仪器测量结果与讨论

使用设计的近红外外差辐射计在合肥市科学岛安光所一号楼 (31.9°N, 117.2°E) 进行实际的整层大气 CO<sub>2</sub> 透过率谱测量, 测量时间为 2022 年 11 月 15 日 13:00—16:00. 当仪器自动运行时, 每 4 min 获取一组数据, 在一组外差信号测量完成后进行下一次测量. 值得注意的是在测量过程中, 云会对我们采集的太阳光产生较大影响, 减小信号光强度, 从而影响外差信号的测量. 所以实时监控太阳光强度, 保证其相对稳定是测量较好外差信号的重要因素. 测量期间信号光功率如图 10 所示, 功率基本稳定在 6.4  $\mu$ W 左右, 阴影部分表示观测路径受到积云影响, 无法进行测量.

在处理测量得到的外差信号时, 避免了复杂的基线拟合, 通过对外差信号做归一化处理即可直接

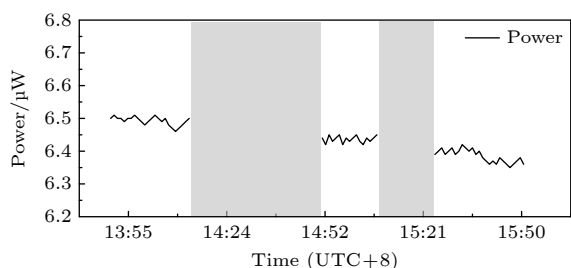


图 10 测量期间信号光功率

Fig. 10. Power of signal during measurement.

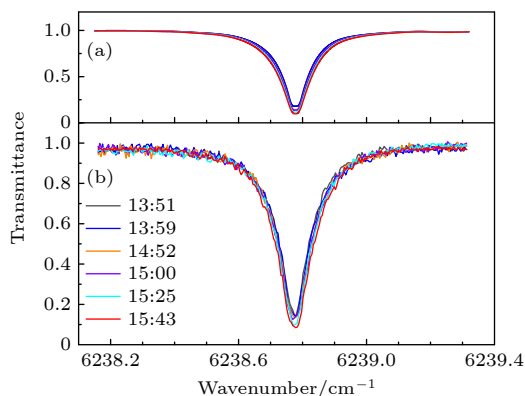


图 11 实测大气 CO<sub>2</sub> 透过率谱与大气辐射模型模拟结果比较 (a) 大气辐射模型模拟结果; (b) 实测大气 CO<sub>2</sub> 透过率谱

Fig. 11. Comparison between the measured atmospheric transmittance spectrum of CO<sub>2</sub> and the simulation results of atmospheric radiation model: (a) The simulation results of atmospheric radiation model; (b) the measured atmospheric transmittance spectrum of CO<sub>2</sub>.

得到整层大气 CO<sub>2</sub> 透过率谱如图 11(b) 所示. 从图 11(b) 可以看到, 测量的大气透过率随着时间明显变化. 这是由于在下午, 太阳天顶角随时间变化而增加, 大气吸收路径增长, 从而测量的大气 CO<sub>2</sub> 透过率减小. 图 11(a) 绘制了大气传输模型的模拟光谱, 测量的大气 CO<sub>2</sub> 透过率与计算得到的大气 CO<sub>2</sub> 透过率谱呈现了一致的变化趋势. 由于附近水汽吸收的干扰以及大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化, 测量的 LHR 谱的线形与模拟光谱的线形和透过率略有不同. 在 15 点 30 分后, 太阳天顶角大于 60°, 测量得到的大气 CO<sub>2</sub> 透过率受大气折射影响较为明显, 测量透过率与模拟透过率差距较大.

## 5 结 论

以中心波长为 1.603  $\mu$ m 的 DFB 激光器作为本振光源, 搭配掺铒光纤放大器, 构造了激光外差辐射计原型机. 利用掺铒光纤放大器的自动功率控制电路可实现本振光激光功率的锁定, 消除由本振光功率变化引起的基线斜率. 使用仪器实现了整层大气 CO<sub>2</sub> 透过率谱的测量, 并与大气辐射模型模拟结果对比, 结果一致, 仪器性能表现良好. 该高度集成的小型化的激光外差辐射计作为一种紧凑、坚固、无人值守的仪器, 在星载和地面观测网络测量大气温室气体中具有很好的应用前景.

## 参考文献

- [1] Cha L L, Wang W, Xie Y, Shan C G, Zeng X Y, Sun Y W, Yin H, Hu Q H 2022 *Spectrosc. Spect. Anal.* **42** 1036 (in Chinese) [查玲玲, 王薇, 谢宇, 单昌功, 曾祥昱, 孙友文, 殷昊, 胡启后 2022 *光谱学与光谱分析* **42** 1036]
- [2] Wang J, Sun C, Wang G, Zou M, Tan T, Liu K, Chen W, Gao X 2020 *Opt. Lasers. Eng.* **129** 106083
- [3] Wang J, Wang G, Tan T, Zhu G, Sun C, Cao Z, Chen W, Gao X 2019 *Opt. Express.* **27** 9610
- [4] Li J, Xue Z Y, Liu X H, Wang J J, Wang G S, Liu K, Gao X M, Tan T 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 074204 (in Chinese) [李竣, 薛正跃, 刘笑海, 王晶晶, 王贵师, 刘锟, 高晓明, 谈图 2022 *物理学报* **71** 074204]
- [5] Lu X, Huang Y, Wu P, Liu D, Ma H, Wang G, Cao Z 2022 *Remote Sens.* **14** 1489
- [6] Xue Z Y, Li J, Liu X H, Wang J J, Gao X M, Tan T 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 217801 (in Chinese) [薛正跃, 李竣, 刘笑海, 王晶晶, 高晓明, 谈图 2021 *物理学报* **70** 217801]
- [7] Deng H, Li R, Liu H, He Y, Yang C, Li X, Xu Z, Kan R 2022 *Opt. Lett.* **47** 4335
- [8] Sappey A, Masterson B, Howell J 2021 *Appl. Opt.* **61** 2697
- [9] Lu X J, Cao Z S, Tan T, Huang Y B, Gao X M, Rao R Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 064208 (in Chinese) [卢兴吉, 曹振松,

- 谈图, 黄印博, 高晓明, 饶瑞中 2019 *物理学报* **68** 064208]
- [10] Xue Z, Shen F, Li J, Liu X, Wang J, Wang G, Chen W, Gao X, Tan T 2022 *Opt. Express* **30** 31828
- [11] Sun C Y, Wang G S, Zhu G D, Tan T, Liu K, Gao X M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 144201 (in Chinese) [孙春艳, 王贵师, 朱公栋, 谈图, 刘锟, 高晓明 2020 *物理学报* **69** 144201]
- [12] Clarke G B, Wilson E L, Miller J H, Melroy H R 2014 *Meas. Sci. Technol.* **25** 055204
- [13] Wilson E L, DiGregorio A J, Riot V J, Ammons M S, Bruner W W, Carter D, Mao J, Ramanathan A, Strahan S E, Oman L D, Hoffman C, Garner R M 2017 *Meas. Sci. Technol.* **28** 035902
- [14] Wilson E L, DiGregorio A J, Villanueva G, Grunberg C E, Souders Z, Milette K M, Menendez A, Grunberg M H, Floyd M A M, Bleacher J E, Euskirchen E S, Edgar C, Caldwell B J, Shiro B, Binsted K 2019 *Appl. Phys. B* **125** 211
- [15] Zenevich S, Gazizov I, Churbanov D, Plyashkov Y, Spiridonov M, Talipov R, Rodin A 2021 *Remote Sens.* **13** 2235
- [16] Wang J J 2021 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [王晶晶 2021 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [17] Deng H, Yang C, Xu Z, Li M, Huang A, Yao L, Hu M, Chen B, He Y, Kan R, Liu J 2021 *Opt. Express* **29** 2003
- [18] Huang J, Huang Y, Lu X, Liu D, Yuan Z, Qi G, Cao Z 2022 *Front. Phys.* **10** 835189
- [19] Hoffmann A, Huebner M, Macleod N, Weidmann D 2018 *Opt. Lett.* **43** 3810
- [20] Parvitte B, Zéninari V, Thiébeaux C, Delahaigue A, Courtois D 2004 *Spectrochim. Acta, Part A* **60** 1193
- [21] Nakazawa M 2014 *Opt. Rev.* **21** 862
- [22] Shen F, Wang G, Wang J, Tan T, Wang G, Jeseck P, Te Y, Gao X, Chen W 2021 *Opt. Lett.* **46** 3171

# Research on application of local oscillator power locking method to laser heterodyne radiometer<sup>\*</sup>

Li Yue<sup>1)2)</sup>   Li Jun<sup>1)2)</sup>   Xue Zheng-Yue<sup>1)2)</sup>   Wang Jing-Jing<sup>2)</sup>  
 Wang Gui-Shi<sup>2)</sup>   Gao Xiao-Ming<sup>1)2)</sup>   Tan Tu<sup>2)†</sup>

<sup>1)</sup> (School of Environmental Science and Optoelectronic Technology,  
 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

<sup>2)</sup> (Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science,  
 Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

( Received 22 February 2023; revised manuscript received 13 March 2023 )

## Abstract

Laser heterodyne radiometer has the advantages of low cost, small size, and high spectral resolution. It can expand the existing ground carbon measurement network, verify satellite observation results, and provide data coverage outside the satellite observation area. Using the existing laser heterodyne radiometer, is presented a prototype of near-infrared laser heterodyne radiometer based on the erbium-doped fiber amplifier that can realize local oscillator power locking. In the laser heterodyne radiometer a distributed feedback semiconductor laser with a center wavelength of 1.603  $\mu\text{m}$  is used as a local oscillator light source. The erbium-doped fiber amplifier is used to enhance the local oscillator power, and the automatic power control circuit is adopted to lock the output optical power of the erbium-doped fiber amplifier. The baseline slope caused by the change of the local oscillator power is eliminated, and the whole layer atmospheric transmittance spectrum without baseline fitting is measured. The instrument performance of a highly integrated laser heterodyne radiometer based on an erbium-doped fiber amplifier is evaluated in detail, and the atmospheric  $\text{CO}_2$  transmittance spectrum is measured in the Science Island (31.9°N, 117.2°E) of Hefei. Six groups of atmospheric  $\text{CO}_2$  transmittance spectra are obtained during the measurement period of one day, which are compared with the simulation results from an atmospheric radiation model, showing that they are consistent with each other. The experimental results show that the application of erbium-doped fiber amplifier can improve the performance of laser heterodyne radiometer, optimize its structure, and provide equipment supplement for realizing unattended long-term atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration observation and building a comprehensive carbon observation network.

**Keywords:** laser heterodyne, optical design, erbium doped fiber amplifier, high resolution spectroscopy

**PACS:** 32.30.Bv, 42.62.Fi, 29.30.-h, 78.47.jh

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230261

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42075128) and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFF1300102-1).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: tantu@aiofm.ac.cn

## 本振光功率锁定方法应用于激光外差辐射计的研究

李月 李竣 薛正跃 王晶晶 王贵师 高晓明 谈图

## Research on application of local oscillator power locking method to laser heterodyne radiometer

Li Yue Li Jun Xue Zheng-Yue Wang Jing-Jing Wang Gui-Shi Gao Xiao-Ming Tan Tu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 093201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230261

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230261>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于高分辨率激光外差光谱反演大气CO<sub>2</sub>柱浓度及系统测量误差评估方法

Atmospheric CO<sub>2</sub> column concentration retrieval based on high resolution laser heterodyne spectra and evaluation method of system measuring error

物理学报. 2020, 69(14): 144201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200125>

激光外差光谱仪模拟风场探测

Simulation of wind field detection by laser heterodyne spectrometer

物理学报. 2022, 71(7): 074204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211252>

激光外差光谱仪的仪器线型函数研究

Instrument line shape function of laser heterodyne spectrometer

物理学报. 2019, 68(6): 064208 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181620>

基于激光外差探测的大气N<sub>2</sub>O吸收光谱测量与廓线反演

Measurement and profile inversion of atmospheric N<sub>2</sub>O absorption spectrum based on laser heterodyne detection

物理学报. 2021, 70(21): 217801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210710>

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

物理学报. 2020, 69(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>

光声光谱仪用三维扩展光源光场整形系统设计与实验

Design and experiment of light field shaping system for three-dimensional extended light source used in photoacoustic spectrometer

物理学报. 2021, 70(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210691>