

激光外差光谱仪模拟风场探测

李竣 薛正跃 刘笑海 王晶晶 王贵师 刘锬 高晓明 谈图

Simulation of wind field detection by laser heterodyne spectrometer

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 074204 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211252

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211252>

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

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>

基于高分辨率激光外差光谱反演大气CO₂柱浓度及系统测量误差评估方法

Atmospheric CO₂ 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>

基于激光外差探测的大气N₂O吸收光谱测量与廓线反演

Measurement and profile inversion of atmospheric N₂O absorption spectrum based on laser heterodyne detection

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

基于多普勒非对称空间外差光谱技术的多普勒测速仿真

Simulation of Doppler velocity measurement based on Doppler asymmetric space heterodyne spectroscopy

物理学报. 2018, 67(14): 140703 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180063>

大孔径空间外差干涉光谱成像技术多谱段成像仿真

Simulation of multiband imaging technology of large aperture spatial heterodyne imaging spectroscopy

物理学报. 2018, 67(23): 234205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180943>

基于噪声免疫腔增强光外差分子光谱技术实现光纤激光器到1530.58 nm NH₃亚多普勒饱和光谱的频率锁定

Frequency locking of fiber laser to 1530.58 nm NH₃ sub-Doppler saturation spectrum based on noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectroscopy technique

物理学报. 2018, 67(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172541>

激光外差光谱仪模拟风场探测*

李竣¹⁾²⁾ 薛正跃¹⁾²⁾ 刘笑海²⁾ 王晶晶²⁾ 王贵师²⁾
刘锬²⁾ 高晓明^{1)2)†} 谈图^{2)‡}

1) (中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 合肥 230031)

2) (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, 基础科学研究中心, 合肥 230031)

(2021年7月5日收到; 2021年12月23日收到修改稿)

中高层大气风场是表征中高层大气环境的重要参量, 对中高层大气风场的探测在民用和军用领域有着重要意义. 激光外差光谱技术是近年来迅速发展的一种高光谱分辨率和灵敏度的被动式遥感探测技术, 以激光外差光谱技术为核心研制的激光外差光谱仪因具有体积小、重量轻、结构稳定等特点, 在星载测量中高层风场领域有巨大的潜力和应用前景. 激光外差光谱仪的地面风场探测性能验证是其应用到卫星上的关键环节, 本文利用实验室环境下建立的风场模拟装置实现 0—25 m/s 的风速变化, 并基于光谱分辨率为 0.003 cm^{-1} 激光外差光谱仪分别测量了无风速变化和不同风速下的 CH_4 吸收谱, 测量风速的分辨率为 3 m/s. 使用光纤 F-P 干涉仪、波长计和参考池对激光器输出光频率进行实时的相对定标和绝对定标. 通过计算吸收光谱中心频率的偏移量, 反演得到风场风速, 并与风场模拟器风速对比, 相对误差为 1.49 m/s. 该实验对激光外差光谱仪测风性能进行有效验证, 证明了使用激光外差光谱仪进行中高层大气风场测量的可能性.

关键词: 激光外差, 高分辨光谱, 模拟实验, 风速测量**PACS:** 42.62.Fi, 32.30.Bv, 29.30.-h, 07.87.+v**DOI:** 10.7498/aps.71.20211252

1 引言

中高层大气风场是表征中高层大气环境的重要参量, 对于中高层大气及上下层之间能量和动量的运输与大气成分的传输都起着巨大作用. 研究中高层大气风场一方面可以增进高空大气动力学过程认知、改善全球高空风场模型、提升大气、空间研究能力, 另一方面通过测量风速风向变化为航天活动提供安全保障服务. 大气风场的研究还可以提高空间气象预报能力、改善全球气候预报能力^[1-3]. 对于中高层大气风场探测技术而言, 被动探测技术可利用高层大气中存在的气辉、极光等辐射源获取

风速信息, 实现全天风速测量. 目前, 成熟的星载被动风场探测主要基于干涉测量法, 使用 Michelson 和 Fabry-Perot 两种干涉仪, 通过接收大气中具有一定多普勒频移的自然光源发出的光信号, 将其转化为干涉条纹的变化, 从而反演中高层大气风场参数. Fabry-Perot 干涉测量技术具有高测量精度和高稳定性等优点, 但是对标准具制作平整度要求极高, 且光通量小、体积大. 而 Michelson 干涉测量技术采用扩视场技术增加系统的光通量, 体积小, 但是存在干涉图采样点数少(四个相位点)、仪器漂移不能被实时跟踪等问题. 除此之外, 动镜的高精度控制也成为 Michelson 干涉仪应用于星载探测的限制因素之一^[4-9]. 这些缺点导致两种干涉

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 41730103)、国家重点研发计划(批准号: 2017YFC0209705)和国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 41805018)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xmgao@aiofm.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: tantu@aiofm.ac.cn

仪应用到卫星平台上较为困难, 想要进一步加强中高层大气风场的监测, 则需要其他测量方法和仪器加以补充.

激光外差光谱技术是近年来发展迅速的一种高光谱分辨和灵敏度的被动式遥感探测技术, 以激光外差光谱技术为核心的激光外差光谱仪具有体积小、重量轻、结构稳定等特点^[10–19], 在星载测风领域有巨大的潜力和应用前景. 20世纪70年代美国加利福尼亚大学 Townes 最早将激光外差光谱技术应用到行星风探测. 1991年美国 NASA 以火星大气层 100–120 km 高度上 CO₂ 中红外波段热辐射作为信号光源, 使用红外外差光谱仪结合麦克马斯太阳望远镜获取了火星热层的绝对风速^[20]. 2007年德国科隆大学使用中红外波段可调谐 CO₂ 激光器作为本振光源, 以望远镜收集金星大气层 CO₂ 辐射光作为信号光, 结合声光分析仪, 对火星赤道风场进行测量^[21]. 若想实现激光外差光谱仪对地球中高层大气风场的测量, 则需要星载仪器在临边探测模式下, 通过测量中高层大气的气体辉光或极光谱线的频移, 反演得到风场信息. 发展星载激光外差光谱测风仪的关键环节是激光外差光谱仪地面风场探测性能验证. 本文利用实验室搭建的模拟风场装置, 开展在不同风速条件下的模拟风场探测实验, 通过计算激光外差光谱仪测量的目标谱线的相对频移量, 反演得到风场风速信息. 此地面实验对激光外差光谱仪的测风性能进行了有效评估, 验证了激光外差光谱仪测量大气风场的可行性.

2 实验原理

2.1 风场模拟原理

中高层大气风场探测一般以气体辉光或极光谱线作为信号光源. 在地面进行模拟实验时, 由于背景大气的散射光掩盖和对流层 O₂ 分子气体吸收作用, O₂ 辉光不可直接作为信号光源^[22]. 超连续谱光源具有宽光谱范围和易于准直等特点, 是模拟风场探测时的理想信号光源. 当环境中存在风场时, 信号光源发出的谱线中心频率会发生频移^[23]. 风场模拟正是基于这一原理, 利用高速电机带动转盘运动形成一定速度来模拟大气环境中的风速, 图 1 为风速模拟原理图. 模拟光源经过充满目标气体的吸收池后携带目标气体的吸收谱, 吸收谱中心频率为 ν_0 , 再垂直入射到转盘竖直方向点 A 上. 转

盘以转速 N_s 匀速转动, 返回光束速度 V_{re} 可表示为

$$V_{re} = 2v_0 \cos \alpha = 4\pi N_s r \cos \alpha \quad (1)$$

其中, r 为 A 点距转盘中心点的距离, v_0 为 A 点的线速度, α 表示光束与反射盘之间的夹角. 返回光束携带的吸收谱频率 ν_0 发生偏移, 偏移量为 $\Delta\nu$:

$$\Delta\nu = \nu_0 \cdot \frac{V_{re}}{c}, \quad (2)$$

其中, c 为光速. 使用斩波器转盘模拟风速变化, 斩波器控制器可实现对斩波器转盘转速在 0–80 r/s 范围内的精确控制, 并且商业斩波器自身结构比较稳定, 在较大转速下仍能保持整个光路的稳定性以及模拟风场风速的精确性.

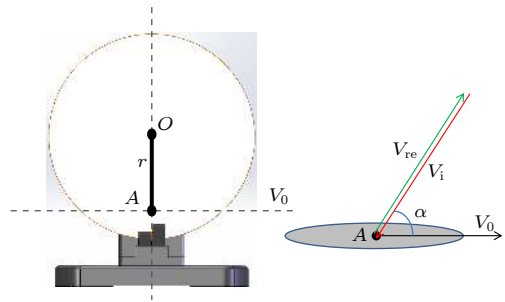


图 1 风速模拟原理图

Fig. 1. Schematic diagram of wind speed simulation.

2.2 激光外差原理

激光外差探测原理在文献^[24–27]中已有详细描述, 假设探测器上接收到的本振光和信号光振幅分别为 A_{LO} 和 A_S , 相位分别为 φ_{LO} 和 φ_S , 即

$$E_{LO} = A_{LO} \cos(\omega_{LO}t + \varphi_{LO}), \quad (3a)$$

$$E_S = A_S \cos(\omega_S t + \varphi_S). \quad (3b)$$

信号光与本振光在光电探测器光敏面上进行光混频, 由于光电探测器的平方律特性以及带宽限制, 光电探测器输出电流 i 可表示为

$$i = \eta \left[\frac{A_S^2}{2} + \frac{A_{LO}^2}{2} + A_{LO}A_S [\cos(\omega_{LO} - \omega_S) + \Delta\varphi] \right], \quad (4)$$

其中, η 为探测器的量子效率, $\Delta\varphi = \varphi_{LO} - \varphi_S$ 为两束光相位差, 输出光电流包含本振光和信号光的直流部分和差频信号部分. 经过 T 型偏置器后, 直流部分被滤除. 差频信号即为外差信号, 可表示为

$$i = \eta A_{LO}A_S [\cos(\omega_{LO} - \omega_S) + \Delta\varphi]. \quad (5)$$

外差信号功率可利用射频功率检测器进行检测, 在实际探测中, 信号平均时间远大于外差信号

的周期, 因此其输出功率正比于差频电流的平方:

$$P_{\text{het}} \propto \eta^2 A_{\text{LO}}^2 A_S^2 R_L. \quad (6)$$

由 (6) 式可以得到, 外差信号功率正比于本振光功率和信号光功率的乘积, 携带气体吸收信息的信号光可以通过本振光进行放大, 实现弱信号探测. 通过改变激光器泵浦电流, 使激光器输出光频率 ω_{LO} 覆盖目标气体的特征吸收谱线对应的频率范围. 对不同频率激光与信号光拍频得到的外差信号进行归一化并进行拟合, 获得吸收谱线的中心频率, 计算吸收谱线相对频移量从而反演得到对应的风速信息.

3 实验系统及测量结果

实验装置示意图和实物图如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 线宽为 2 MHz 的分布反馈式激光器 DL 作为本振光源, 通过激光控制器对激光器进行控制, 激光器输出波长为 1651 nm (6056.935 cm^{-1}), 最大输出功率达 20 mW, 在温度为 293.6 K 的条件下, 泵浦电流在 60—100 mA 范围内变化, 激光器输出范围为 $6056.342\text{—}6057.334 \text{ cm}^{-1}$.

输出激光通过 10:90 的光纤分束器 FC1 分成两路, 10% 的光进入光纤 F-P 干涉仪, 90% 的光耦合到 20:80 的 FC2 光纤分束器. 耦合到 FCC 分束器的光 20% 进入参考通道的 50:50 分束比例的 FC3

光纤分束器, 分别进入到参考吸收池和波长计, 进入到参考吸收池的一路用于测量标准参考吸收池内的直接吸收信号, 以确定不存在风场时 CH_4 吸收谱的中心频率, 进入到波长计的一路用于波长计定标. 耦合到 FC2 分束器的光 80% 耦合到 FC4 合束器, 与携带待测风速信息的超连续谱光在合束器 FC4 内进行共线传输, 进入到探测器 PD3 进行拍频探测.

超连续谱光源 (SC-5, 安扬激光, 输出光光谱范围为 470—2400 nm) 作为信号光源, 出射光经过斩波器调制, 通过充满纯甲烷的吸收池、抛物镜中心小孔然后入射到表面贴有逆反射膜的风速模拟器上, 风速模拟器与光路夹角为 45° . 风速模拟器转盘直径为 140 mm, 最大转速为 100 r/s, 通过调节转盘的转速可实现 0—25 m/s 的风场变化. 信号光携带的吸收谱经过匀速转动的转盘获得稳定频移, 在逆反射膜上反射, 沿原光路返回抛物镜表面, 光路转折 90° . 由聚焦透镜 ($f = 25.4 \text{ mm}$) 将信号光耦合进单模光纤, 信号光与本振光由光纤耦合器 FC4 合束, 在光电探测器 PD3 进行拍频.

光电探测器 PD3 产生的拍频信号经射频电路单元处理. 射频电路单元主要由 T 型偏置器 (Bias-T)、多级放大器 (OA)、带通滤波器 (BP filter) 和检波器 (Schottky Diode) 组成. 带通滤波器的带宽决定了激光外差系统光谱分辨率, 激光信号、背景

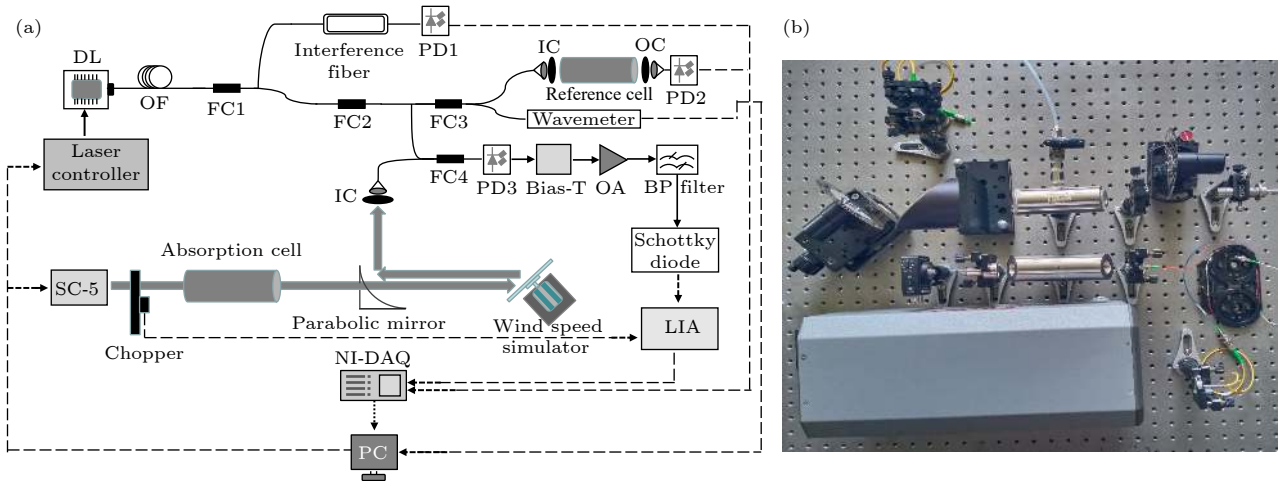


图 2 实验装置示意图与实物图. SC-5, 超连续谱光源; PD, 光电探测器; FC, 光纤耦合器; IC, 输入准直器; OC, 输出准直器; Bias-T, T 型偏置器; OA, 前置放大器; BF-Filter, 带通滤波器; LIA, 锁相放大器; DL, 分布反馈式激光器; Chopper, 斩波器; Schottky Diode, 肖特基二极管

Fig. 2. Schematic diagram and physical diagram of the experimental device. SC-5, supercontinuum light source; PD, photodetector; FC, fiber coupler, IC, input collimator; OC, output collimator; Bias-T, T-type bias; OA, preamplifier; BF-Filter, band-pass filter; LIA, lock-in amplifier; DL, distributed feedback laser.

信号和外差信号的功率谱如图 3 所示. 由于激光器驱动电路的干扰, 激光信号功率谱在 0—100 MHz 存在大量噪声, 400—600 MHz 区域内的噪声由放大器与检波器等射频器件导致, 外差检测时需要避开这些区域. 在保证外差信号信噪比的条件下, 选择带通滤波器范围为 225—270 MHz, 由此带来双边带光谱分辨率为 90 MHz (0.003 cm^{-1}), 此时激光外差光谱仪测风的分辨率为 3 m/s. 滤波后处于射频域的信号经检波器转化为直流信号, 并由锁相放大器解调, 锁相参考频率 780 Hz, 积分时间 1 s.

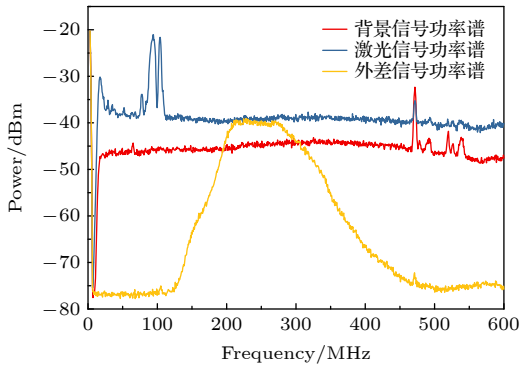


图 3 信号功率谱
Fig. 3. signal power spectrum.

为实现激光频率的准确测量和矫正, 采用光程差为 20 cm, 自由色散范围为 $D^* = 0.01167 \text{ cm}^{-1}$ 的光纤 F-P 干涉仪 (Interference fiber) 和波长计 (Bristol instrumnets, 621) 对输出激光实时定标. 两束相同频率的激光在光纤中传播, 经过光纤 F-P 干涉仪内的两根不同光纤产生光程差, 合束后入射到光电探测器 PD1 表面获得干涉信号. 测量激光经过吸收池后的直接吸收光谱, 确定 CH_4 的中心线位置, 并结合干涉信号数据对输出激光频率进行相对定标和绝对定标 [26]. 通过干涉光纤信号的时间扫描如图 4(a) 所示, 相邻信号最大值之间的频谱距离对应于干涉光纤的自由色散范围. 图 4(b) 在控制温度为 293.6 K 条件下, 泵浦电流由 60 mA 变化至 100 mA 波长计实时测量的激光器输出光频率.

外差信号由上述的激光外差系统进行电流逐点步进扫描获得, 如图 5(a) 所示. 实验中扫描电流间隔为 0.2 mA, 采集一组 CH_4 吸收光谱, 时间为 300 s. 图 5(a) 中将扫描电流转换成对应标定波长, 对锁相放大器解调得到的外差信号不含吸收的部分做线性拟合, 计算出基线, 再做归一化处理得到

吸收谱线信号, 表现为透过率谱, 如图 5(b) 所示. 吸收谱线的中心频率偏移量间接反映了风场风速, 当风速模拟器转盘转速 $n = 15 \text{ r/s}$, 入射点距转盘中心 $r = 37 \text{ mm}$ 时, 模拟风场风速为 5 m/s, 此时 CH_4 气体吸收光谱的中心频率偏移量为 0.0002 cm^{-1} . 图 5(c) 为不同转速条件下归一化的 CH_4 吸收谱.

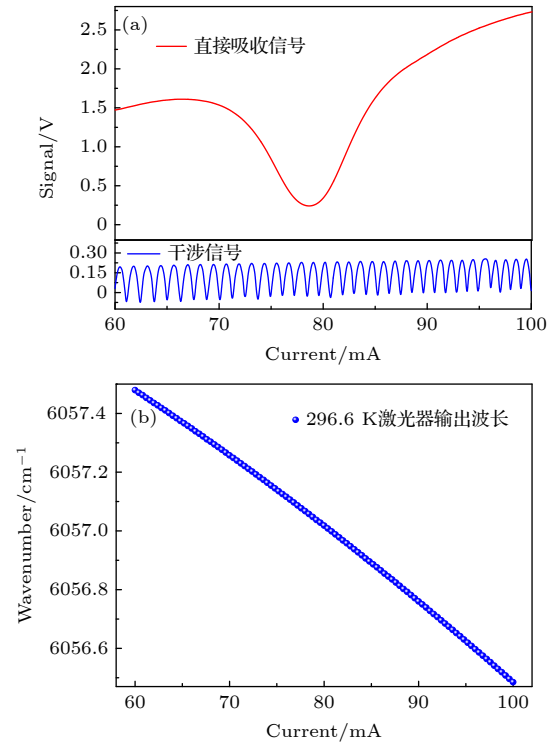


图 4 输出光波长标定 (a) 经过参考池后 PD2 探测得到的直接吸收信号 (红色实线), 经过干涉光纤后的信号 (蓝色实线); (b) 波长计实时定标

Fig. 4. Laser wavelength calibration: (a) Absorption signal (red dotted line) detected by PD2 after passing through the reference cell, and the signal after passing through the interference fiber (black solid line); (b) real-time calibration of the wavemeter.

4 实验结果与分析

分别设置风场模拟器转盘转速为 0, 15, 30, 45, 60, 75 r/s, 模拟风速采用 (1) 式计算获取, 对应模拟风场风速分别为 0, 5, 10, 15, 20, 25 m/s. 图 6(a) 为在不同风速下对激光外差光谱仪测量得到的 CH_4 吸收光谱的拟合. 将测量得到的中心频率的频移量代入 (2) 式计算, 得到对应转速下实际测量得到的风场风速. 图 6(b) 为模拟风速和测量风速随着转盘转速变化的关系图以及两者的误差. 可以看出, 在低的风速条件下, 由于低风速引起的

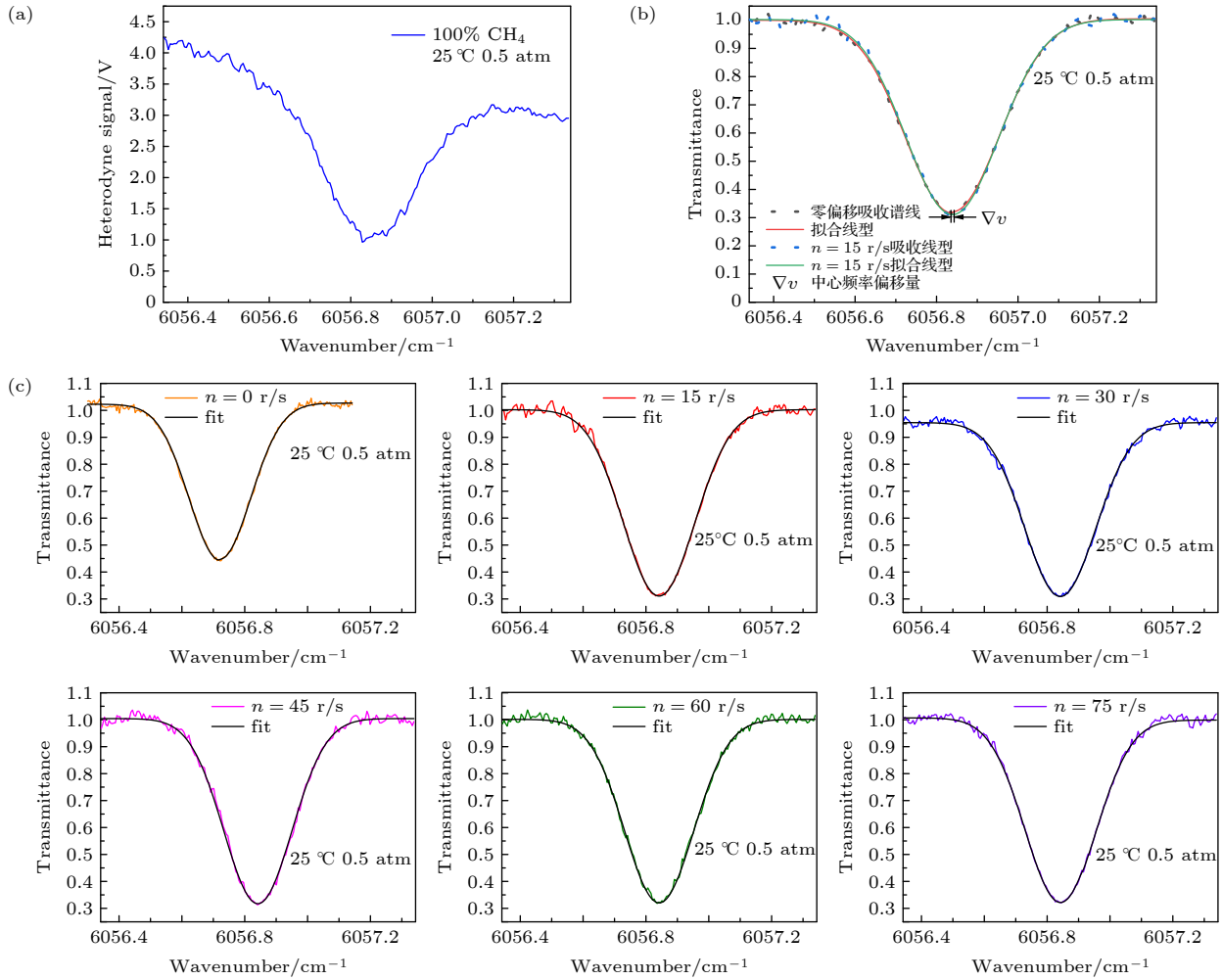


图 5 (a) 逐点扫描数据图; (b) 无风场时吸收谱和存在风场时吸收谱

Fig. 5. (a) Point-by-point scanning data chart; (b) absorption spectrum without wind field and absorption spectrum with wind field; (c) normalized absorption spectrum of CH_4 under different speed conditions.

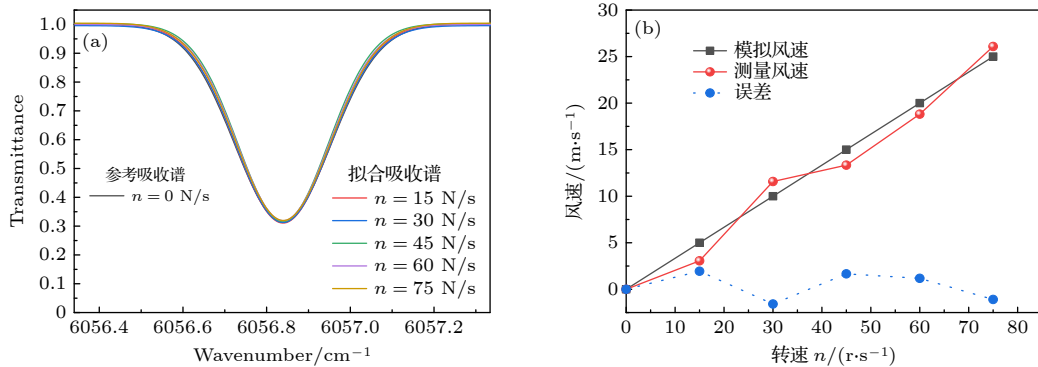


图 6 (a) 拟合吸收谱; (b) 测量结果

Fig. 6. (a) Fitted absorption spectrum; (b) inversion result.

谱线多普勒频移量小, 拟合引入的误差较大. 当风场模拟器转盘高转速运行时, 系统仍能保持稳定, 模拟风场的风速变大, 吸收谱线的中心频移量大, 此时反演误差相对较小, 整体测量的相对误差为 1.49 m/s.

5 结论

在实验室环境下建立了一套稳定且风速、风向可控的模拟实验装置, 风速在 0—25 m/s 范围内

可调. 利用光谱分辨率为 0.003 cm^{-1} 的激光外差光谱仪测量超连续谱光源照射在风速模拟器后发生多普勒频移的 CH_4 吸收谱, 使用光纤式 F-P 干涉仪、参考池和波长计对激光器频率进行定标, 测得了间隔 5 m/s 的风速变化的多普勒激光外差光谱, 相对误差为 1.49 m/s . 实验室验证了激光外差光谱仪测量风速的可行性, 为进一步开展激光外差光谱测量高层大气风场及发展星载激光外差测风光谱仪奠定了基础.

参考文献

- [1] Zhang L, Zhang C M, Jian X H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 899 (in Chinese) [张霖, 张淳民, 简小华 2010 物理学报 **59** 899]
- [2] Wang H M, Wang Y M, Fu J G, Zhang Z M 2016 *Chin. J. Space Sci.* **36** 352 (in Chinese) [王后茂, 王咏梅, 付建国, 张仲谋 2016 空间科学学报 **36** 352]
- [3] Zhang C M, Zhu H C, Wang D Y, Zhao B C, Dai H S, Zhang L 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 900136 (in Chinese) [张淳民, 朱化春, 王鼎盛, 赵葆常, 代海山, 张霖 2011 光学学报 **31** 900136]
- [4] Shepherd G G, Thuillier G, Cho Y M, Dubois M L, Evans W F J, Gault W A, Hersom C, Kendall D J W, Lathuillière C, Lowe R P, McDade I C, Rochon Y J, Shepherd M G, Solheim B H, Wang D Y, Ward W E 2012 *Rev. Geophys.* **50** RG2012
- [5] Shepherd G G, Thuillier G, Gault W A, Solheim B H, Hersom C, Alumni J M, Brun J F, Brune S, Charlot P, Cogger L L, Desaulniers D L, Evans W F, Gattinger R L, Girod F, Harvie D, Hum R H, Kendall D W, Llewellyn E J, Lowe R P, Ohrt J, Pasternak F, Peillet O, Powell T M, Rochon Y, Ward W E, Wiens R H, Wimperi S 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 10725
- [6] Hays P B, Abreu V J, Dobbs M E, Gell D A, Grassl H J, Skinner W R 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 10713
- [7] Jiang T, Shi H L, Shen J, Dai H S, Xiong W 2018 *Acta Photonica Sin.* **47** 7 (in Chinese) [姜通, 施海亮, 沈静, 代海山, 熊伟 2018 光子学报 **47** 7]
- [8] Shepherd G G, Cho Y M 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 7036
- [9] Wang L, Zhao B C, Zhang C M 2008 *Optics and Precision Engineering* **16** 426 (in Chinese) [汪丽, 赵葆常, 张淳民 2008 光学精密工程 **16** 426]
- [10] Weidmann D, Perrett B J, Macleod N A, Jenkins R M 2011 *Opt. Express.* **19** 9074
- [11] Tsai T R, Rose R A, Weidmann D, Wysocki G 2012 *Appl. Opt.* **51** 8779
- [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 P, Ramanathan A, Strahan S E, Oman L D, Hoffinan C, Garner R M 2017 *Meas. Sci. Technol.* **28** 035902
- [14] Wilson E L, DiGregorio A J, Villanueva G, Grunberg C E, Souders Z, Miletti 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-LASERS O* **125** 211
- [15] Wang J, Wang G, Tan T, Zhu G, Sun C, Cao Z, Chen W, Gao X M 2019 *Opt. Express* **27** 9610
- [16] Wilson E L, McLinden M L, Miller J H, Allan G R, Ott L E, Melroy H R, Clarke G B 2014 *Appl. Phys. B* **114** 385
- [17] 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, 刘锬, 高晓明 2020 物理学报 **69** 144201]
- [18] 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]
- [19] 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]
- [20] Goldstein J J, Mumma M J, Kostiuk T, Deming D, Espenak F, Zipoy D 1991 *Icarus* **94** 45
- [21] Sorniga M, Livengood T, Sonnabend G, Kroetz P, Stupar D, Kostiuk T, Schieder R 2008 *Planet. Space Sci.* **56** 1399
- [22] Gao H 2008 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [高红 2008 博士学位论文(北京: 中国科学院大学)]
- [23] Ye J Y, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 67 (in Chinese) [叶剑勇, 张淳民, 赵葆常, 李英才 2008 物理学报 **57** 67]
- [24] Klimchuk A Y, Nadezhinskii A I, Ponurovskii Y Y, Shapovalov Y P, Rodin A V 2012 *Quantum Electron.* **42** 244
- [25] Zenevich S G, Klimchuk A Y, Semenov V M, Spiridonov M V, Rodin A V 2019 *Quantum Electron.* **49** 604
- [26] Parvite B, Zéninari V, Thiébeaux C, Delahaigue A, Courtois D 2004 *Spectrochim. Acta, Part A* **60** 1193
- [27] 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)]

Simulation of wind field detection by laser heterodyne spectrometer^{*}

Li Jun¹⁾²⁾ Xue Zheng-Yue¹⁾²⁾ Liu Xiao-Hai²⁾ Wang Jing-Jing²⁾
Wang Gui-Shi²⁾ Liu Kun²⁾ Gao Xiao-Ming^{1)2)†} Tan Tu^{2)‡}

1) (*School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China*)

2) (*Basic Science Research Center, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Material Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(Received 5 July 2021; revised manuscript received 23 December 2021)

Abstract

The middle- and upper- atmosphere wind field are important parameters that characterize the middle- and upper-atmosphere environment, respectively. The detection of the middle- and the upper-atmosphere wind field are of great significance in the civil field and military field. Laser heterodyne spectroscopy technology is a passive remote sensing detection technology with high spectral resolution and sensitivity, and has developed rapidly in recent years. The laser heterodyne spectrometer that takes laser heterodyne spectroscopy technology as its core, is developed due to its small size, light weight and stable structure. The verification of the ground-based wind field detection performance of the laser heterodyne spectrometer is a key part of its application to satellites. In this paper, a wind speed simulation device is built in a laboratory environment to achieve a wind speed change from 0 m/s to 25 m/s in a wind field. A laser heterodyne spectrometer with a spectral resolution of 0.003 cm^{-1} is used to measure the CH_4 absorption spectrum without and with a wind field for different wind speeds, the resolution of measuring wind speed is 3 m/s. For relative and absolute calibration of the distributed feedback laser (DL) frequency, an interference fiber with a free dispersion range $D^* = 0.01167\text{ cm}^{-1}$, a wavemeter and a reference cell is used. The experimental results effectively verify the wind measurement performance of the laser heterodyne spectrometer and prove the possibility of using the laser heterodyne spectrometer to measure the atmospheric wind field.

Keywords: laser heterodyne, high-resolution spectroscopy, simulation experiment, wind speed measurement

PACS: 42.62.Fi, 32.30.Bv, 29.30.-h, 07.87.+v

DOI: 10.7498/aps.71.20211252

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41730103), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFC0209705), and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41805018).

[†] Corresponding author. E-mail: xmgao@aiofm.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: tantu@aiofm.ac.cn