

基于匹配算法的脉冲差分吸收 CO₂ 激光雷达的稳频研究

马昕 龚威 马盈盈 傅东伟 韩舸 相成志

Research on the frequency stabilization of pulsed differential absorbing lidar for CO₂ detection based on matching algorithm

Ma Xin Gong Wei Ma Ying-Ying Fu Dong-Wei Han Ge Xiang Cheng-Zhi

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 154215 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.154215

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154215>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2015/V64/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于差分吸收光谱技术的大气痕量气体二维观测方法

Two-dimensional observation of atmospheric trace gases based on the differential optical absorption spectroscopy technique

物理学报.2015, 64(16): 164209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164209>

车载多轴差分吸收光谱探测对流层 NO₂ 分布研究

Detection and distribution of tropospheric NO₂ vertical column density based on mobile multi-axis differential optical absorption spectroscopy

物理学报.2015, 64(11): 114211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114211>

机载成像差分吸收光谱技术测量区域 NO₂ 二维分布研究

Observation of two-dimensional distributions of NO₂ with airborne Imaging DOAS technology

物理学报.2015, 64(3): 034217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034217>

温室气体及碳同位素比值红外光谱反演精度的影响因素研究

Influence factors of quantitative analysis precision of greenhouse gases and carbon isotope ratio based on infrared spectroscopy

物理学报.2015, 64(2): 024217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024217>

氧气 A 带吸收系数的温度依赖关系研究

Study on the temperature dependence of oxygen A-band absorption coefficient

物理学报.2014, 63(21): 214204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214204>

基于匹配算法的脉冲差分吸收CO₂激光雷达的稳频研究*

马昕¹⁾ 龚威^{1)2)†} 马盈盈¹⁾ 傅东伟³⁾ 韩炯¹⁾ 相成志¹⁾

1)(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

2)(地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079)

3)(武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079)

(2015年2月4日收到; 2015年4月19日收到修改稿)

利用差分吸收激光雷达探测大气CO₂, 可以获得其浓度的垂直分布, 对于研究碳源、碳汇的过程有重要意义. 设计了一套种子注入的脉冲差频激光器系统, 作为差分吸收激光雷达的激光光源. 针对脉冲差分吸收CO₂激光雷达 on 波长的高精度稳频的研究空白, 本文提出一种基于匹配的 on 波长的连续稳频算法. 其基本思想是采用分子饱和吸收法, 测量通过双路吸收池后的差分信号, 计算其光学厚度值 (optical depth, OD), 获得实测的伪吸收谱, 当监测到 on 波长发漂移后, 进行连续的波长调节, 获取其 OD 值, 最后基于一维的图像匹配算法, 将 OD 值作为灰度值, 利用图像匹配原理, 进行 OD 值匹配, 确定当前输出波长在伪吸收谱中的位置, 进而调节至 on 波长, 实现 on 波长的连续、稳定输出. 实验结果表明, 提出的稳频算法能够很好的满足高精度的稳频要求, 同时差平方和法在该应用中是最优的, 稳频精度可达到 0.3 pm.

关键词: 差分吸收, CO₂, on 波长稳频, 匹配

PACS: 42.68.Ca, 02.70.Hm, 42.68.Wt, 42.60.-v

DOI: 10.7498/aps.64.154215

1 引言

CO₂ 是温室气体的主要组成部分, 具有吸热和隔热的功能, 其温室效应会使地球表面温度逐渐升高, 同时引起海平面升高, 会对人类的生存环境产生巨大的影响^[1-3]. 激光雷达是观测大气垂直分布的理想探测设备, 能够提供连续的时间和空间观测. 而差分吸收激光雷达是测量 CO₂ 浓度廓线的有效和先进手段, 其采用双波长或者多波长发射, 通过测量随高度变化的激光雷达回波信号, 利用差分算法来计算大气中 CO₂ 的浓度分布. 目前已有多家研究机构展开了差分吸收 CO₂ 激光雷达的研究工作: 欧洲航天局采用 2.0 μm 波段的机载激光雷达测量 CO₂ 的柱浓度^[4-5]; 日本宇宙航空研究

开发机构采用 1.57 μm 波段的种子注入的光学参量振荡器 (optical parametric oscillators, OPO) 技术, 利用多波长的种子激光器注入, 实现多波长的输出^[6,7]; 美国国家航空航天局 (NASA) 机载 1.57 μm 波段的连续多波长扫描, 实现 CO₂ 测量^[8,9], 另外中国科学院安徽光学精密机械研究所也开展了利用拉曼激光雷达探测低对流层大气 CO₂ 分布的实验, 并取得了初步的 CO₂ 浓度探测结果^[10-12]. 中国科学院上海技术物理研究所也研制出连续波探测硬目标的差分吸收 CO₂ 激光雷达^[13].

对激光器稳频的目的是使发射激光的频率 (波长) 稳定在某单一频率或者较小的频率范围内^[14]. 相较于 SO₂, O₃ 等气体的差分探测, 用差分吸收激光雷达进行 CO₂ 探测对于激光的稳频要求更高, 这主要由 CO₂ 吸收谱线中的相对较窄的半高宽所决

* 国家自然科学基金 (批准号: 41127901) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助 (批准号: 2014619020201) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gongweiwu@gmail.com

定. 由于CO₂的吸收谱形状是典型的峰高谷平, 吸收峰较陡, 而吸收谷变化较为平缓, 因此对于差分吸收CO₂激光雷达的稳频, 主要是针对on波长, 通常情况下, 正常运行的激光器发射off波长, 其偏差都在容许范围内, 因此对on波长的稳频是研究的重点.

国外差分吸收CO₂激光雷达的激光光源一般采用的是种子注入的OPO技术, 因此, 其稳频直接针对种子源——连续波(continuous wave, CW)半导体激光器——稳频^[6,15,16], 一般采用主动稳频技术进行激光稳频, 具体为: 制定一个频率标准, 通过一定的手段判断发射激光的频率是否偏离此标准频率, 当发生频率发生偏离时, 通过设计反馈控制系统进行激光频率调节, 使之恢复为原来的标准频率, 实现稳频. 其稳频方法一般采用频率调制技术(frequency modulation, FM), 将种子激光器的输出激光频率锁定在CO₂的吸收峰上. 将频率调制后的激光束通过CO₂吸收池, 记录相位敏感度探测产生的鉴频信号, 其正比于当前输出频率与吸收谱线中心的偏移量. 通过闭合回路的反馈调节(控制半导体激光器的电流与温度), 实现稳频. 另一方面, 中国科学院上海技术物理研究所提出了脉冲间隔扫描式的稳频方法, 在脉冲间隔内完成种子激光器的稳频, 简单易行, 同样适用于OPO的种子激光器的频率稳定^[17].

由武汉大学研制的脉冲差分吸收CO₂激光雷达, 其激光源采用的是染料激光与YAG激光的差频激光, 输出波长在1572 nm附近, 由于激光光源的复杂性与特殊性, 其稳频技术同OPO激光器的不同, 必须针对脉冲激光进行稳频, 这也增加了稳频工作的难度. 目前国内外还没有相关脉冲差分吸收CO₂激光雷达on波长稳频的相关研究, 由此开展相应的脉冲激光稳频工作.

本文着眼于脉冲CO₂差分吸收激光雷达的高精度的连续on波长稳频, 首先介绍了差分吸收激光雷达的基本原理和实验采用的激光光源组成, 包括CW种子激光器, Nd: YAG固体激光器、染料激光器以及差频激光器. 进而介绍了稳频的基础——硬件系统搭建, 在此基础上进行了脉冲激光测量CO₂伪吸收谱的实验, 着重介绍了基于匹配的稳频算法的原理, 最后利用模拟实验评价各类匹配测度算法, 选取最优算法, 采用实测实验进行结果验证, 结果表明提出的稳频算法能够很好的完成稳频

工作, 且精度高, 速度极大优于人工判读.

2 种子注入脉冲差频激光器系统

2.1 差分吸收激光雷达原理

差分吸收激光雷达是发射两束稍有差别的激光束, 一束激光的波长位于被探测气体(如CO₂)谱线的吸收峰处, 使其受到最大吸收, 称为on波长; 另一束激光的波长位于被探测气体谱线的吸收谷处, 使其受到的吸收最小, 称为off波长^[18]. 从本质上看, 差分吸收激光雷达在某种程度上可以当做Mie散射激光雷达, 其回波信号主要是Mie散射信号, 可用信号表现在被探测气体对于激光束能量的吸收. 通过对应的激光雷达方程——(1)式, 以及被探测气体的平均密度公式——(2)式, 可以看出, 双波长回波信号的差别主要是由被探测气体对不同波长激光的不同的吸收引起的.

$$P(R, \lambda) = \frac{1}{2} \frac{EA\eta C(\lambda)}{R^2} \beta(R, \lambda) \exp \left\{ -2 \int_0^R [\alpha_0(\lambda, R) + N_g(R)\sigma_g(\lambda)] dR \right\}, \quad (1)$$

式中 P 表示发射波长为 λ 的激光雷达在距离 R 处的接收功率, E 是激光输出能量, A 是望远镜的接收面积, η 是激光雷达重叠因子, c 是光速, β 为大气后向散射系数, α_0 代表除被探测组分的吸收之外的所有大气物质的消光系数, N_g 代表被探测组分密度的高度分布, σ_g 代表被探测组分的吸收截面积, 与激光发射波长相关.

由于两束波长非常接近, 那么 β, α_0, E, η 近似相等. 将两式相除, 则高度 R 处厚度为 $\Delta R = R_2 - R_1$ 的大气层中, 被探测组分的平均密度为

$$N_g = \frac{1}{2[\sigma_g(\lambda_{on}) - \sigma_g(\lambda_{off})](R_2 - R_1)} \times \ln \frac{P(\lambda_{off}, R_2)P(\lambda_{on}, R_1)}{P(\lambda_{on}, R_2)P(\lambda_{off}, R_1)}. \quad (2)$$

由上式可见, 被探测组分的密度与两通道回波信号之比和两波长处的吸收截面积之差有关. on波长和off波长在理论上确定后, 各自的吸收截面积可以由公式计算得到; 两通道的回波信号强度直接同发射波长相关, 而两波长对CO₂的吸收特性的不同, 使得回波信号强度具有一定的差异性, 这种差

异性就是差分吸收激光雷达测量气体浓度的基础,同时考虑到吸收谱中 ω_n 波长附近的吸收率变化剧烈, 轻微的波长偏移会带来吸收上相对较大的差别, 因此需要将 ω_n 波长严格的稳定在吸收峰上, 对 ω_n 波长的稳频具有迫切性. 可以这样认为, 将 ω_n 波长实现稳频后, 很容易确定 ω_{off} 波长. 同时实际在反演计算时, 由于 ω_{off} 波长的吸收截面积同 ω_n 相比可忽略, 往往也只关注 ω_n 波长的相关参数值.

2.2 种子注入脉冲差频激光器系统

对于差分吸收 CO_2 激光雷达, 目前国际上, 通常选取 $1.57 \mu\text{m}$ 以及 $2.0 \mu\text{m}$ 附近的 CO_2 吸收谱线, 受限于 $2.0 \mu\text{m}$ 光电探测器的获取困难, 国内研究集中在 $1.57 \mu\text{m}$ 附近. CO_2 在 $1.57 \mu\text{m}$ 处的吸收谱线的半高宽相较于 O_3 , SO_2 , NO_2 等更窄. 而对于 $1.57 \mu\text{m}$ 的光源目前国外研究机构一致采用的是 OPO 技术, 利用脉冲激光对 OPO 晶体 (如 KTP 晶体) 进行抽运, 通过设定晶体参数, 可以确定抽运产生的闲频光和信号光的频率, 信号光的频率锁定通过种子注入实现, 相应的, OPO 激光器的稳频, 一般是通过对种子激光器稳频来实现.

由于国外相关技术封锁, 武汉大学自主研发了一台种子注入式的脉冲差频激光器系统^[19]. 该系

统由种子激光器、Nd: YAG 激光器、倍频晶体、染料激光器、差频晶体组成, 如图 1 所示: CW 种子激光器作为种子源输出连续窄线宽激光, 通过光纤注入到 Nd: YAG 激光器的谐振腔内, Nd: YAG 激光器同时输出的 1064 nm 的基频光和 532 nm 的倍频光, 同时内置一个较为简单的反馈机理用于种子激光器的调节; 532 nm 的绿光作为抽运源对染料进行抽运, 染料激光器产生广谱荧光, 光栅进行荧光选取, 输出 634 nm 的红光, 并作为差频源之一; 1064 nm 的近红外激光经过光程补偿后, 同 634 nm 的红光在非线性差频晶体处实现差频, 输出 1572 nm 红外激光. λ_{DFG} 是差频后的激光波长, λ_1 和 λ_2 分别为差频源激光的波长, 则激光差频波长的公式为

$$\lambda_{\text{DFG}} = \left| \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}} \right|. \quad (3)$$

λ_1 和 λ_2 分别是染料激光器输出的 634 nm 的红光以及 Nd: YAG 激光器的基频光 1064 nm 的近红外光, 激光器最终输出的是差频得到的 1572 nm 的激光, 并通过调整染料激光器实现差频激光的波长调节.

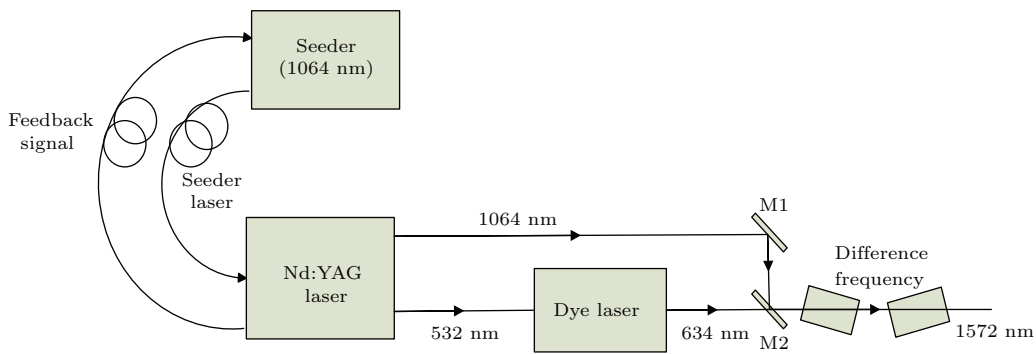


图 1 种子注入脉冲差频激光器系统

Fig. 1. The system of seeder injected pulsed difference frequency laser.

3 脉冲稳频系统搭建

脉冲激光能量具有极大的不稳定性, 尤其是所采用的差频激光系统, 其激光输出能量的波动更为剧烈, 图 2 是实测的单一波长的能量波动, 采用的是 Ophir 生产的激光能量计, 不考虑明显的能量噪点, 该激光能量的波动性可达到 $\pm 15\%$, 如果采用

单光路的 CO_2 吸收池实验, 其探测结果无法反应吸收情况, 吸收信息会被淹没在较高的激光能量波动中. 因此考虑到能量波动大的特点, 稳频系统采用双光路的差分探测, 单波长激光经过分光, 一路激光通过 CO_2 气体吸收池, 一路激光经过没有吸收效应的吸收池, 通过差分探测计算多脉冲平均后的光学厚度值, 来判断 CO_2 的吸收情况.

光学厚度 (optical depth, OD) 指光束在介质

中的传播路径上被散射或吸收的比率, 是无量纲量, 在本文中以OD值来衡量CO₂的吸收. I₀是光源的辐射强度, I是光束通过介质后的辐射强度, 那么光学厚度计算公式为

$$OD = -\ln\left(\frac{I_0}{I}\right). \quad (4)$$

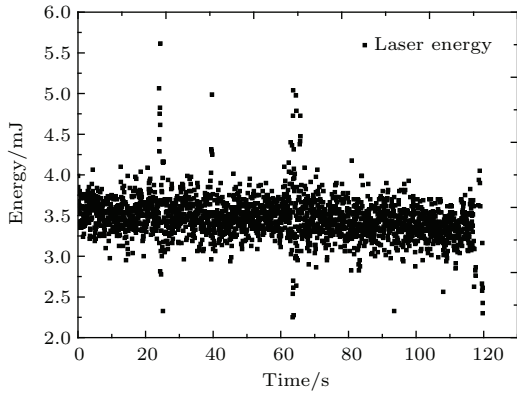


图2 输出激光的能量分布

Fig. 2. The energy distribution of the output laser.

稳频系统的核心部分是双光路的吸收池, 通过分光光路将单束激光一分为二, 分别通入充满CO₂和N₂的16 m长程吸收池, 吸收池出光口分别用铟钾砷探测器进行探测, 记录二者的能量探测结果, 将通过CO₂吸收池后的激光能量作为I, 通过N₂的吸收池的能量作为I₀, 计算其OD值, 能反映出CO₂对通过吸收池的激光的吸收情况.

在激光波长进行调节时, 由于是采用差频方法

出光, 必然有差频晶体及补偿器的角度调节, 而输出不同波长, 这一角度会产生轻微变化, 直接的结果是不同的波长激光入射到吸收池的位置不同, 从而导致示波器探测到的能量波形不一致, 因此调节波长必须相应地对光路进行调节, 否则这种不一致会一直延续引起误差. 而光纤光路通过光纤准直器可以比较完美的解决这一问题, 图3是脉冲激光稳频系统的原理图. 经分光镜分光后, 4%的激光射入红外脉冲波长计进行波长粗定标, 首先确定出射激光大致的波长位置. 由于实验中采用的是波长极为相近的激光, 其激光器出射激光角度只有些许偏差, 经分光镜透射的96%的激光采用凸透镜进行聚焦, 其焦点会位于同一位置上, 这就消除了激光角度的偏差. 利用光纤准直器(由尾纤与自聚焦透镜精确定位而成)进行收光, 将光耦合至单模光纤内, 在光纤内自由传输, 采用定制的光纤分光器实现10%, 90%的精确分光. 在光纤出光处, 同样采用光纤准直器, 将光纤内的自由传输光转变成准直光分别入射充满标准大气压强N₂的16 m长程气体吸收池A和充满标准大气压强CO₂的16 m长程气体吸收池B, 在吸收池出光口分别采用铟钾砷探测器进行能量探测, 由高速示波器采集, 其触发信号由激光器提供, 同时, 计算机的作用是存储示波器的能量采集值和波长计的定标值, 以及实现对脉冲激光器的反馈控制.

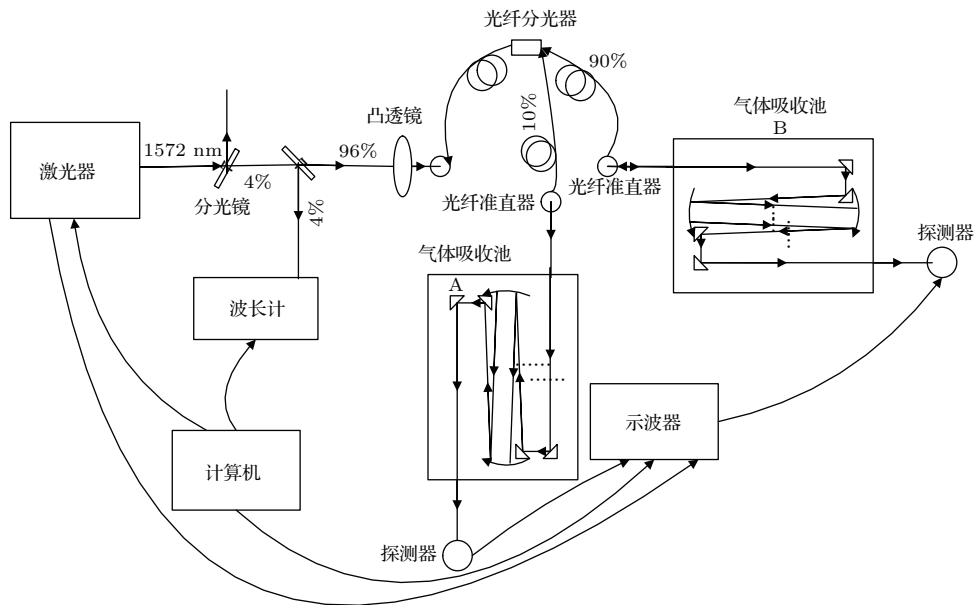


图3 脉冲激光稳频系统

Fig. 3. The frequency stabilization system of pulsed laser.

4 基于匹配的差分吸收CO₂激光雷达的长时间稳频算法

差分吸收CO₂激光雷达的稳频主要是指on波长的频率稳定,本文中主要采用饱和吸收法进行on波长的稳频.

4.1 伪吸收谱测量

目前,应用于大气CO₂气体浓度反演的最为广泛地数据库是HITRAN(the high-resolution transmission molecular absorption database),数据库中已经有国外相关机构实测的CO₂吸收谱线^[20,21],该数据库作为理论修正值,具有很高的参考价值.国内有中南民族大学的相关测量成果^[22],则更具有借鉴意义.

相较于脉冲激光光源,CW激光测量吸收谱具有其独特的优点,CW激光器光源稳定,扫描周期短,测量吸收谱时噪声较小,一般来说采用CW激光进行稳频操作时,不需要单独进行吸收谱测量.

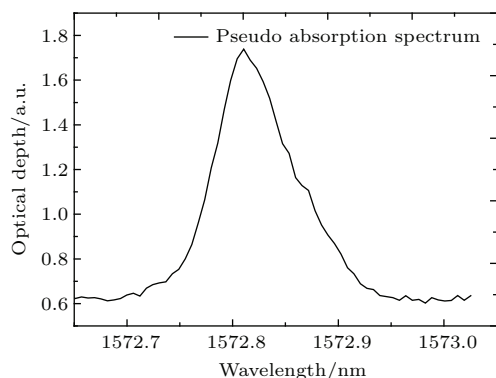


图4 实际测得的典型的CO₂伪吸收谱

Fig. 4. The measured typical CO₂ pseudo absorption spectrum.

相较而言,脉冲激光具有很大的不稳定性,包括能量不稳定、激光光斑不稳定以及激光指向不稳定,因此针对脉冲激光稳频必须有自测的吸收谱或伪吸收谱,脉冲激光器系统的稳频工作才能顺利进行.脉冲激光下的CO₂的吸收谱测量需要利用OD值作为吸收的判断标准,由于脉冲激光的不稳定性,单一激光脉冲的OD值具有较大的波动性,因此需要将同一波长的激光脉冲的OD值进行平均后,获取其伪吸收谱.本文采用的方法是采集40个脉冲后进行平均.图4是实际测得的扣除本底噪声

后的脉冲激光的伪吸收谱,横轴坐标是激光器的显示波长,不代表实际波长值,称之为伪吸收谱的原因主要是本文测量得到的“吸收谱”只能定性的反映CO₂气体对不同波长激光的吸收强弱,而无法量化的得到如同HITRAN数据库中的吸收系数等具体数据,但是通过比较本文测得的伪吸收谱同数据库中的吸收谱具有很大的相似性.

4.2 基于匹配的长时间稳频算法

由于探测器噪声及随机误差的影响,使得实验中测得的单一波长的OD值仍然存在一定的波动性,无法精确描述CO₂对该波长激光的吸收情况.在激光雷达的实际运行过程中,若on波长出现偏移,理想的应对方案是对on波长重新稳频,即重新对一定波长范围内的发射激光进行CO₂伪吸收谱测量,根据测量得到的吸收情况,找到吸收最大值——吸收峰,其对应on波长,并通过波长调节操作,将波长跳转至on波长处,相成志等在文章中对跳转的方法进行了具体的介绍^[23].该方法可以满足不连续观测实验的需求,然而在激光雷达的连续运行中,这种稳频方法十分耗时,无法实现连续观测.鉴于此,提出基于匹配连续观测下的稳频算法.

CO₂浓度的反演主要依据差分吸收激光雷达浓度反演方程(2),由方程(2)以及伪吸收谱图4可知,CO₂的吸收谱的半高宽非常窄,若激光器输出的on波长发生偏移,即发射波长偏离CO₂的吸收峰,会导致大气CO₂对其的吸收情况发生很大变化,引起激光雷达回波信号能量的巨大反差,而在反演过程中不会对相关重要参数进行调节(主要是on波长的吸收截面积),带来反演结果的不准确性,因此对on波长的稳频成为研究的重点.

若需要实现长时间、连续的激光雷达回波信号积分(积分时间大于5 min),以期获取较为光滑的激光雷达回波信号廓线,那么在该连续时间内的脉冲差频激光器系统的on波长稳频的流程如图5所示.

其具体方法为:

1) 依次记录当前输出激光的OD值.

2) 如果连续2个OD值小于阈值,则判断为出现波长漂移.调节激光器输出波长,为了减小随机噪声对于OD值的影响,以3倍的最小步长(本文采用的激光器最小步长为0.01 pm@634 nm,

0.06 pm@1572 nm) 向长波方向连续调节6次, 每个波长输出5个脉冲.

3) 记录6个输出波长的每个脉冲的OD值, 并计算每个波长OD的均值, 记作 $g(i)$, ($i = 1, 2, 3, \dots, 6$), 同测量得到的伪吸收谱进行匹配, 匹配后确定当前波长的位置, 并计算当前波长同 on 波长的波长差值.

- 4) 根据波长差值直接跳转到 on 波长.
- 5) 重复步骤1—4至实验结束.

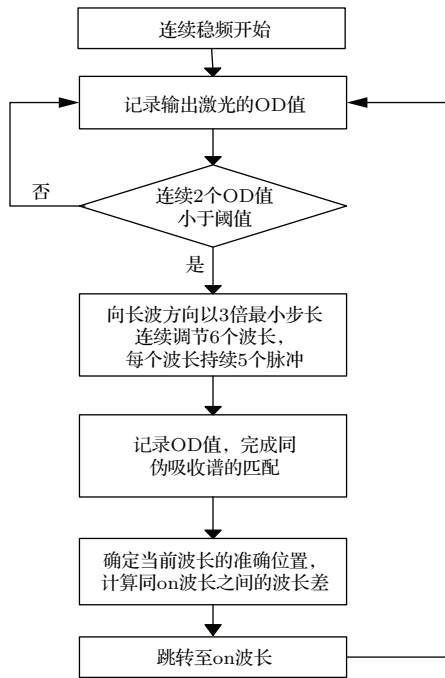


图5 基于匹配的稳定连续频率算法流程图

Fig. 5. The diagram of the continuous frequency stabilization method based on matching algorithm.

步骤2中的阈值采用经验值. 若实验没有连续进行, 实验条件的变化, 尤其是环境温度的改变, 会带来OD值的整体测量差异, 因此需要进行连续不断的实验测量, 根据拟合后的吸收峰附近的OD值来确定阈值, 阈值一般根据精度要求, 以吸收峰处的OD值为基础进行选取.

在影像匹配中, 同名点的确定是以匹配测度为基准的, 基于统计理论的匹配测度被广泛接受, 常用的基本算法有相关函数、协方差函数、相关系数、差平方和以及差绝对和等. 在图像处理领域, 对于离散数据, 目标窗口的灰度函数为 $g_{i,j}$, 搜索区灰度函数为 $g'_{i+r,j+c}$. 以差平方和匹配为例, 其算法可以定义为

$$S^2(c, r) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (g_{i,j} - g'_{i+r,j+c})^2, \quad (5)$$

其中, $g_{i,j}$ 是目标窗口图像的在位置 (i, j) 的灰度值, $g'_{i+r,j+c}$ 是待匹配图像的在位置 $(i+r, j+c)$ 的灰度值, $S^2(c, r)$ 是差平方和函数, 如果 $S^2(c_0, r_0) < S^2(c, r)$ 且 $c \neq c_0, r \neq r_0$, 那么 c_0, r_0 就是搜索区相对目标区影像的位移参数^[24]. $S^2(c, r)$ 最小值表明二者之间的差别最小, 在图像表现为目标窗口同已定位的待匹配图像的灰度最为一致.

本文中, 在步骤3)中得到的OD值等同于图像中的灰度值, 所不同的是前者为一维数据, 后者一般为二维. 因此前者的匹配具体可以采用一维图像的匹配方法进行匹配. 将测量得到的CO₂伪吸收光谱(一维数据, 忽略波长信息)作为参考数据——待匹配图像, 将测量得到的连续6个波长的OD值作为目标图像的灰度值. 测量得到的OD值是一维、离散的数据, 具体采用差平方和法进行匹配:

$$S^2(c) = \sum_{i=1}^m (g_i - g'_{3i+c})^2, \quad (6)$$

其中, $m = 6$, g_i 是步骤2)中第 i 次连续调节波长后获得的OD值, g'_{3i+c} 是CO₂吸收光谱中 $3i+c$ 处的OD值, $S^2(c)$ 是相关函数, 如果 $S^2(c_0) < S^2(c)$ 且 $c \neq c_0$, 那么 c 就是位移参数, $S^2(c)$ 最小表明了二者的光学厚度最为一致. 需要注意的是 g'_{3i+c} 中的 $3i$ 目的是使得在OD值匹配的过程中, 伪吸收谱中的波长数间隔同步骤2)中的波长数间隔相一致. c_0 代表了测得的伪吸收谱的起始波长同本步骤中连续调节的起始步长之间的步长数的差值, 从而可以确定后者在伪吸收谱(图4)中的位置, 获得其准确的波长值, 并计算当前终止波长同 on 波长的准确差值, 实现波长跳转到吸收峰处, 完成稳频操作.

5 实验对比与精度分析

在激光雷达正常运行时, 激光的稳频应当采用即时处理方法, 即在数据采集过程中监测到输出波长出现偏移后, 利用匹配算法进行对应处理, 获取位移参数后进行 on 波长调节.

5.1 模拟实验与分析

为了在常用匹配测度算法中挑选最优的匹配算法, 完成对各种匹配算法的对比, 首先进行了基于 HITRAN 数据库 CO₂ 吸收谱的模拟实验, 另外挑选三组有代表性的6波长OD值模拟数据(4.2小

节中的步骤3)), 进行实验对比. 三组模拟数据的分别位于吸收峰左侧、跨越吸收峰、吸收峰右侧, 图6是HITRAN数据库中提取的局部真实吸收谱, 最高点对应的横轴即为 ω_0 波长. 需要注意的是该吸收谱更加平滑、对称, 同图4测量得到的伪吸收谱有明显的区别.

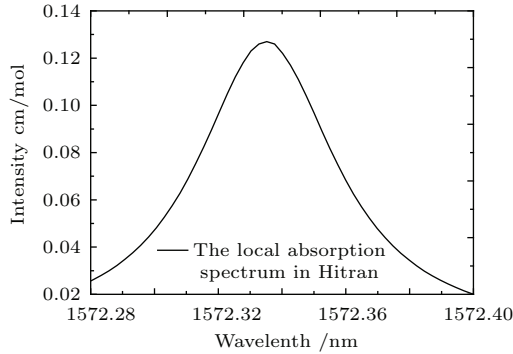


图6 HITRAN数据库中的局部吸收谱, 以吸收峰1572.335 nm中心

Fig. 6. The local absorption spectrum in HITRAN centered at the absorption peak, 1572.335 nm.

对比的参数主要包括匹配结果——位移参数, 以及时间耗费的统计. 后者主要利用了matlab程序进行统计: 考虑到稳频是实时运行的, 因此算法计算的时间越短, 越有利于快速调节输出波长.

模拟实验开始前, 通过人工判别以确定三组模拟数据正确的位移参数, 分别为108, 94, 100. 表1展示了采用不同匹配算法, 实验得到的位移参数以及时间耗费, 运算结果完全正确的是差平方和以及差绝对值和两种方法, 表明传统的图像匹配算法并不能全部满足本实验的要求. 分析其具体原因主要是由于在影像匹配中, 其灰度值是离散的、不连续的, 具有一定的随机性, 没有固定的函数可以用来描述其灰度分布情况, 而本文中是进行的OD值的匹配, 目标窗口中的OD值分布基本固定, 以 ω_0 波长为中心呈左右对称装. 而前两种匹配方法总是找到匹配计算的最大值, 永远在 ω_0 波长处, 因此三次匹配结果的位移参数均为97, 而第三种方法——相关系数法是标准化的协方差函数, 其本质是协方差函数同两信号方差的比值, 仍然存在类似问题, 同样不适用于本文的匹配. 在运算结果正确的前提下, 考虑到时间耗费, 最终选择了差平方和作为本文以及后续实验的匹配方法. 模拟实验的结果表明, 在匹配结果正确的前提下, 差平方和具有运算简便、速度快的优点, 适用于大量连续数据的处理.

表1 位移参数及时间耗费统计

Table 1. The Statistics of displacement parameters and time-consuming.

| 匹配算法 | data_1 | | data_2 | | data_3 | |
|-------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | 位移参数/a.u. | 时间耗费/s | 位移参数/a.u. | 时间耗费/s | 位移参数/a.u. | 时间耗费/s |
| 相关函数法 | 97 | 0.003035 | 97 | 0.013744 | 97 | 0.009970 |
| 协方差函数 | 97 | 0.002422 | 97 | 0.004244 | 97 | 0.004713 |
| 相关系数法 | 111 | 0.024820 | 94 | 0.019475 | 100 | 0.016602 |
| 差平方和 | 108 | 0.004375 | 94 | 0.003428 | 100 | 0.002372 |
| 差绝对值和 | 108 | 0.004415 | 94 | 0.002579 | 100 | 0.004593 |

5.2 实测实验与分析

为了验证算法的有效性, 进行了连续稳频实验, 采用的是图3的脉冲激光稳频系统. 控制的变量主要是气体吸收池的温度和压强, 并分别严格稳定在4°C(实验室的环境温度约为20 °C)和1个标准大气压. 其中, 考虑到吸收池温度的变化会直接引起CO₂吸收谱的中心波长(ω_0 波长)频移, 对温度稳定性要求较高, 相对而言, 对吸收池高温的控制较为容易, 只需要通过温度检测和加热丝即可完成, 而冷却装置较为复杂, 因此吸收池的控制温度

高于室温. 由于脉冲激光的特殊性——单一激光脉冲能量的不稳定, 稳频精度的评价方法仍利用OD值进行判别. 通过长时间序列的OD值采集处理, 对稳频效果进行判断.

在实测数据实验中, 采用实际测得的伪吸收谱, 如图4所示, 认定采用的 ω_0 波长为1572.81638 nm, 该波长是激光器显示波长, 不代表实际发射波长, 并确定在此吸收峰处的OD值的经验值为1.932307(方便实时处理, 未考虑背景噪声), 根据经验情况, 阈值选取为 $\sigma < 1.932307 - 10^{-4}$, 约为四个最小步长. 需要特别指出的是, 该阈值的

选取同吸收峰及其周围波长处的OD值有关,同时测量得到的是伪吸收谱,只能反映不同波长的吸收情况,同HITRAN数据库的吸收谱的不同主要体现在“同一”波长对应的“吸收强度”不同,同时本文中的这种“强度”与光路调节有关,如果光路发生变化以及分光光纤分光比例的变化必然会引起同一波长的OD的变化,因此在稳频实验进行前,必须进行多轮的伪吸收谱测量实验,以获得新的OD经验值.

在获得伪吸收谱后,进行波长扫描,确定on波长的位置,并将激光器发射波长调节到on波长处.图7是在伪吸收谱的右支选取的任一固定波长的OD值随时间的变化趋势,线性拟合结果的直线斜率为负值,即输出波长的OD值在下降,表明激光器的输出波长随着时间发生了漂移,同时考虑到当前波长位于伪吸收谱的右支,可以判断波长在向长波方向移动.因此可以得出结论,在不采取任何人工干预的情况下,激光器波长有向长波方向漂移的趋势,这一结论也在进一步的实验中得到证实:在连续6 h的波长扫描实验中,比较每轮次确定的on波长,约向长波方向漂移了40 pm.由此推断,有进行脉冲激光on波长稳频操作的必要性.

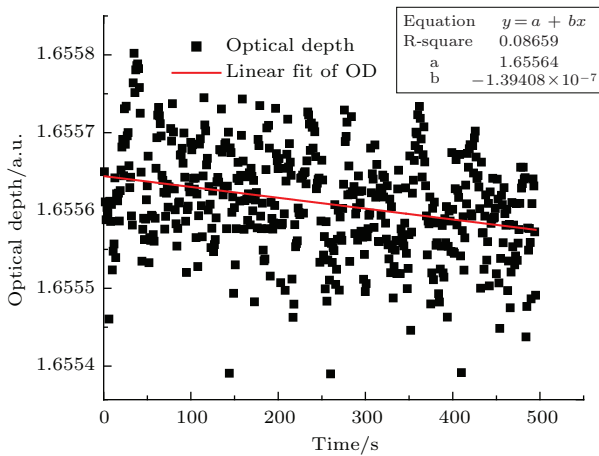


图7 (网刊彩色) 伪吸收谱右支“固定”波长的OD值
Fig. 7. (color online) The OD of the fixed wavelength at the right branch of the pseudo absorption spectrum.

图8是稳频操作下的发射on波长的OD值,图中的红线是指选定的吸收峰处的经验值,总体来讲OD值波动较小,且控制在阈值范围内,认为达到了需要的稳频精度,实现了on波长的稳定发射.具体来讲,在五分钟内,激光器发射波长基本稳定在容许精度范围内,但随着时间的推移,受环境温度及种子激光器的影响,波长发生了漂移,相应的,稳频程序检测到波长漂移并随之进行了波长调

节,使之重新回到on波长处,我们认为在800 s的时间内共发生了两次波长漂移.我们通过后期的连续实验发现,实验进行的时间越长,on波长发生偏移的概率越高,相邻两次需要进行波长调节的时间越短.因此受限于本文所采用的激光器,连续的稳频操作时间不应当长于1 h.

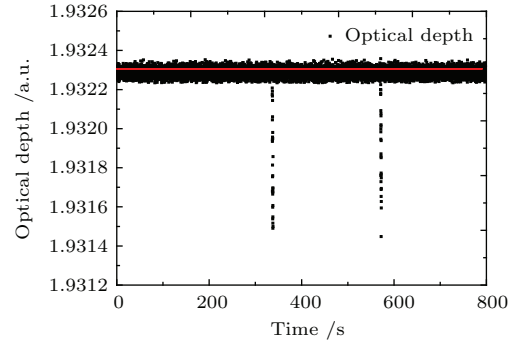


图8 (网刊彩色) 稳频操作下的发射波长的OD值
Fig. 8. (color online) The OD of the emission wavelength under the operation of frequency stabilization.

4.2小节步骤2)中的波长连续调节,为了尽可能提高数据的可用度和实验的准确性,防止由于噪声的污染使不同波长的OD值混叠,连续的6波长调节的步长选为3倍最小步长,以提高相邻波长间OD值的差别,更好的完成匹配工作.图9是连续6波长调节后放大的局部OD值图,由于其时间相邻,因此在图8中近似排列为一条竖线.若采用测量伪吸收谱的以最小步长进行调节必然会使得不同波长的OD值混叠,完成稳频操作则必将增加连续波长调节的个数,带来更大的时间耗费,同时为最终的CO₂浓度反演引入更多的误差.从图9中可以发现,虽然单一波长的OD值噪声较大,但6个不同波长的OD值呈现了依序下降的趋势,证明了这种3倍最小步长调节的有效性和必要性.

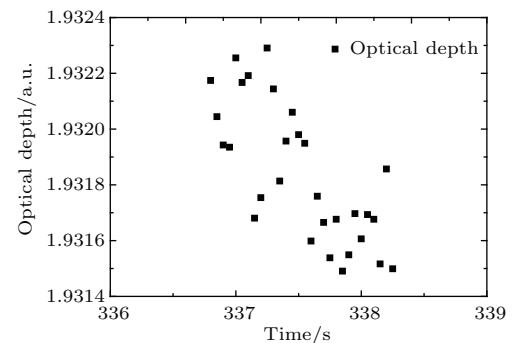


图9 连续6波长调节后的局部放大的OD值
Fig. 9. The regional OD after the wavelength adjustment.

根据阈值范围(为四个最小步长, ± 0.24 pm), 同时考虑到误差影响, 可以认为当前波长稳频的精度为 ± 0.3 pm, 可以满足高精度差分吸收 CO₂ 激光雷达的探测需求. 需要指出的是, 对本文提出的稳频算法而言, 吸收池的环境情况直接影响了出射波长的波长. 本文为了操作简便和提高实验的可控性, 控制的吸收池温度变量为 40 °C, 而进行稳频操作下的激光雷达实验时的吸收池温度选择还有待研究.

6 结 论

差分吸收激光雷达在测量大气 CO₂ 浓度方面的潜力巨大. 本文通过介绍武汉大学自主研制的差分吸收 CO₂ 激光雷达, 提出针对该激光光源的稳频工作, 重点介绍了稳频算法. 针对脉冲激光的不稳定性引起的探测结果不稳定, 提出基于匹配连续稳频算法. 该算法的基本思想是基于气体分子的饱和吸收法, 获取连续波长的 OD 值, 采用 OD 值匹配的方法, 确定当前序列波长在伪吸收谱中的位置, 从而将输出激光的波长进行调节至 on 波长处. 经过验证相关的匹配算法, 发现其同传统图像匹配存在不同点, 最终挑选相应的匹配算法完成 OD 匹配. 实验结果表明, 选取的匹配方法有效且快速, 可以实现连续稳频, 稳频精度达到 0.3 pm, 克服了脉冲激光的稳频难点, 该工作对其他染料激光器的稳频也具有借鉴意义.

但是本文提到的方法仍然具有一定的局限性, 该脉冲激光的稳频精度无法达到连续激光稳频的精度, 主要是由激光器发射的脉冲激光所决定的. 由于自行搭建的激光器系统采用的是种子注入式的, 其发射的是波长在 1064 nm 的窄线宽连续激光, 种子激光波长受温度和电流的影响^[15,16], 种子波长直接影响 YAG 激光器和染料激光器的输出波长, 进而最终影响差频输出的红外波长, 而本文提出的方法没有针对种子激光器波长的漂移进行校正. 本文的做法是监测到差频激光的输出波长发生变化后, 调节染料激光器的波长, 利用差频(3)式, 实现最终输出波长的正确调节. 另外在 4.2 小节中, 通过连续调节波长获取稳频的相关数据, 也在激光雷达运行过程中引入误差, 即接受到的回波信号中存在少量的非 on 波长的信号, 尽管这种误差是单个脉冲的, 一般情况下会在回波信号累计平均的过程

中被弱化, 其影响相对较小, 但是误差的引入也是不可避免的.

参考文献

- [1] Bauer J E, Cai W J, Raymond P A, Bianchi T S, Hopkinson C S, Regnier P A 2013 *Nature* **504** 61
- [2] Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, Mackenzie F T, Gruber N, Janssens I A, Laruelle G G, Lauerwald R, Luysaert S, Andersson A J 2013 *Nature Geoscience* **6** 597
- [3] Fung I Y, Doney S C, Lindsay K, John J 2005 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **102** 11201
- [4] Pliutau D, Prasad N S 2012 *Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis* San Diego, California, United States, January 29–February 1, 2012 LT6B.10
- [5] Abshire J B, Riris H, Allan G R, Weaver C J, Mao J P, Sun X L, Hasselbrack W E, Yu A, Amediek A, Choi Y, Browell E V 2010 *Proc. SPIE7832, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VI*, Toulouse, France, September 20, 2010 78320D-13
- [6] Numata K, Chen J R, Wu S T, Abshire J B, Krainak M A 2011 *Appl. Opt.* **50** 1047
- [7] Sakaizawa D, Nagasawa C, Nagai T, Abo M, Shibata Y, Nakazato M, Sakai T 2009 *Appl. Opt.* **48** 748
- [8] Allan G R, Riris H, Abshire J B, X. Sun, Wilson E, Burris J F, Krainak M A 2008 *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, United States, March 1–8, 2008 p1
- [9] Abshire J B, Riris H, Allan G R, Weaver C J, Mao J, Sun X, Hasselbrack W E, Kawa S R, Biraud S 2010 *Tellus B* **62** 770
- [10] Yu H, Hu S, Wu X Q, Cao K F, Meng X Q, Yuan K E, Huang J, Shao S S, Xu Z H 2012 *Acta Optica Sinica* **32** (8) 13 (in Chinese) [于海利, 胡顺星, 吴晓庆, 曹开法, 孟祥谦, 苑克娥, 黄见, 邵石生, 徐之海 2012 光学学报 **32** (8) 13]
- [11] Wu J, Wang X H, Fang Y H, Xiong W, Shi H L, Qiao Y L 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0101 (in Chinese) [吴军, 王先华, 方勇华, 熊伟, 施海亮, 乔延利 2011 光学学报 **31** 0101]
- [12] Zhao P T, Zhang Y C, Wang L, Hu S X, Su J, Cao K F, Zhao Y F, Hu H L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 010335
- [13] Liu H, Shu R, Hong G L, Zheng L, Ge Y, Hu Y H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104214 (in Chinese) [刘豪, 舒嵘, 洪光烈, 郑龙, 葛焯, 胡以华 2014 物理学报 **63** 104214]
- [14] Cheng B, Wang Z Y, Wu B, Xu A P, Wang Q Y, Xu Y F, Lin Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 104222
- [15] Raybaut M, Schmid T, Godard A, Mohamed A K, Lefebvre M, Marnas F, Flamant P, Bohman A, Geiser P, Kaspersen P 2009 *Opt. Lett.* **34** 2069
- [16] Ishii S, Mizutani K, Fukuoka H, Ishikawa T, Baron, P Iwai H, Aoki T, Itabe T, Sato A, Asai K 2010 *Proc. SPIE 7860, Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XI* Incheon, Republic of Korea, October 28, 2010 786004

- [17] Ge Y, Hu Y H, Shu R, Hong G L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 020702 (in Chinese) [葛焯, 胡以华, 舒嵘, 洪光烈 2015 物理学报 **64** 020702]
- [18] Yan J X, Gong S S, Liu Z S 2011 *Environmental monitoring lidar* (Beijing: Science Press) (Ed. 2nd) pp184–185 (in Chinese) [阎吉祥, 龚顺生, 刘智深 2011 环境监测激光雷达 (北京: 科学出版社) (第2版) 第184—185页]
- [19] Gong W, Ma X, Dong Y N, Lin H, Li J 2014 *Opt. Laser Technol.* **56** 52
- [20] Rothman L, Gordon I, Babikov Y, Barbe A, Chris Benner D, Bernath P, Birk M, Bizzocchi L, Boudon V, Brown L 2013 *J. Quant. Spectrosc. Ra.* **130** 4
- [21] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, Benner D C, Bernath P F, Birk M, Boudon V, Brown L R, Campargue A, Champion J P 2009 *J. Quant. Spectrosc. Ra.* **110** 533
- [22] Zhu X F, Lin Z X, Liu L M, Shao J Y, Gong W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 174203 (in Chinese) [朱湘飞, 林兆祥, 刘林美, 邵君宜, 龚威 2014 物理学报 **63** 174203]
- [23] Xiang C Z, Gong W, Ma X, Cheng X W 2014 *Acta Optica Sinica* **9** 161 (in Chinese) [相成志, 龚威, 马昕, 程学武 2014 光学学报 **9** 161]
- [24] Zhang J Q, Pan L, Wang S G 2009 *Photogrammetry* (Hubei: Wuhan University Press) pp152–157 (in Chinese) [张剑清, 潘励, 王树根 2009 摄影测量学 (湖北: 武汉大学出版社) 第152—157页]

Research on the frequency stabilization of pulsed differential absorbing lidar for CO₂ detection based on matching algorithm*

Ma Xin¹⁾ Gong Wei^{1)2)†} Ma Ying-Ying¹⁾ Fu Dong-Wei³⁾ Han Ge¹⁾ Xiang Cheng-Zhi¹⁾

1) (State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, Wuhan 430079, China)

2) (Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan 430079, China)

3) (School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

(Received 4 February 2015; revised manuscript received 19 April 2015)

Abstract

The differential absorption lidar (DIAL) can help us to obtain the vertical distribution of the atmospheric CO₂ concentration, which is important to the study of carbon sources and carbon sinks. We design a seeder injected pulsed laser system, working as the laser source of the CO₂ DIAL. Unlike the other CO₂ DIALs, our laser source is the result of difference frequency of two lasers at the wavelengths of 1064 nm and 634 nm, respectively. It should be pointed out that the high frequency (wavelength) accuracy and stability of the emission laser, especially the on-line one, are greatly required in the CO₂ DIAL system. However, the mechanical properties of the dye laser (634 nm) and the application of laser difference frequency technique make the wavelength drift constantly; besides, the extremely unstable energy of the pulsed laser increases the difficulty in identifying and stabilizing the on-line wavelength. Hence, a fast and efficient frequency (wavelength) stabilization method is needed to achieve a stable emission wavelength. Aiming at the research gap of the high precision requirements of on-line laser for this kind of pulsed DIAL, we propose a frequency stabilization method based on matching algorithm. The basic idea is to utilize the saturable absorption of CO₂ molecule, by measuring the differential residual-intensity after the laser passing through dual absorption cells to calculate the optical depth (OD) and obtain the so-called pseudo CO₂ absorption spectrum, which can be used to identify the on-line laser accurately. Finally, based on the matching algorithm of one-dimensional image, treating the OD as the gray value in the image, we implement the OD matching as a most important part in the process of frequency stabilization, and determine the exact position of the real-time output laser in the measured pseudo absorption spectrum. Thus, when some errors happen to the monitored ODs, by continuously adjusting the wavelength of the laser, the proposed method can fulfill the wavelength adjustment and accomplish the continuous frequency stabilization for on-line laser. Experimental results show that the frequency stabilization algorithm based on OD matching can satisfy the requirements for pulsed on-line laser frequency stabilization, and the sum of squares of deviation method is the optimal one in this application, with a stabilization accuracy of 0.3 pm. Besides, the proposed method can also be introduced in other laser frequency stabilization.

Keywords: differential absorption, CO₂, frequency stabilization of on-line laser, matching

PACS: 42.68.Ca, 02.70.Hm, 42.68.Wt, 42.60.-v

DOI: 10.7498/aps.64.154215

* Project supported by National Nature Science Foundation of China (Grant No. 41127901) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2014619020201).

† Corresponding author. E-mail: gongweiwhu@gmail.com