

文章编号: 1001-3806(2017)05-0688-05

可调谐激光光谱系统中光学条纹的补偿方法

赵双琦¹, 熊博², 王晓飞¹, 孔全存¹

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192; 2. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 为了消除光学条纹对检测精度的影响, 基于光学条纹的映射特性, 提出了一种可有效补偿光路中平行介面造成的光学条纹的方法。在 CO₂ 检测系统中进行了理论分析和实验验证, 并展示了该方法的使用过程及补偿结果。结果表明, 即使在光学条纹漂移的情况下, 该方法仍可有效补偿光学条纹, 使测量信号与标准气体吸收信号的拟合相关度由 0.8298 提升至 0.9934, 体积分数测量值标准差由 1260×10^{-6} 降低至 48.5×10^{-6} 。该方法极适合补偿检测器窗、气体池窗以及其它已集成于系统的光学元件造成的光学条纹, 在可调谐二极管激光器吸收光谱技术领域具有较大的应用价值。

关键词: 光谱学; 可调谐二极管激光光谱; 光学条纹; 气体检测; 二次谐波

中图分类号: O433.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.05.014

Suppression method for optical fringes in TDLAS systems

ZHAO Shuangqi¹, XIONG Bo², WANG Xiaofei¹, KONG Quancun¹

(1. School of Instrument Science and Opto Electronic Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. School of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to suppress effect of optical fringes on detection accuracy, based on the characteristics of optical fringes, a method was proposed to compensate the optical fringes produced by parallel surfaces. Theory analysis and experimental verification were performed in a carbon dioxide detection system. The process and compensation results were shown. The results show that even in the case of optical fringe drift, the method can effectively compensate the optical fringes. The fitting correlation between the measured gas absorption signal and the standard gas absorption signal is increased from 0.8298 to 0.9934. The standard deviation of the measurement value of volume fraction was reduced from 1260×10^{-6} to 48.5×10^{-6} . The method is very suitable for compensating the optical fringes caused by detector windows, gas pool windows, and other optical elements integrated into the system. It has great application value in the field of tunable diode laser absorption spectroscopy.

Key words: spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; optical fringe; gas detection; the second-harmonic signal

引言

可调谐二极管激光器吸收光谱技术(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)常用于环境、生物、航天等领域的气体信息的精密检测^[1-3]。目前常用波长调制的方式,通过检测待测气体的二次谐波吸收线形,反演出高精度的气体浓度、温度、压强等信息^[4-7]。

光学条纹是影响 TDLAS 技术检测稳定性及精度的主要因素^[8-10]。激光在光学元件表面之间多次反

射,多次反射光在光电检测器光敏面上发生干涉产生光学条纹,这一现象又称标准具效应。激光器透射窗、光纤端面、准直器端面、气体池、检测器保护外壳等均有可能造成光学条纹。光学条纹可等效于系统存在一个虚假的光谱吸收信号,给气体吸收信号线形拟合、峰值提取等分析结果带来误差。环境温度变化或外力使元件发生形变等均可使光学条纹发生漂移等改变,因此,光学条纹难以通过预先测量的背景信号的方法去除^[8]。

针对光学条纹干扰问题,许多学者进行了研究,目前主要的光学条纹抑制方法可分为以下 4 类:(1)平衡检测方法。使用分束器分离出参考光路,将两路信号相减,消除激光器噪声的同时消除光路相同部分产生的光学条纹^[11-12],该方案从原理上难以消除分光镜后,即光路不相同部分产生的光学条纹,如气体池、检测器窗等;(2)通过震动光学元件、旋转漫反射盘改变光程,使标准具信号变成近似随机的信号,再通过多次

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51675054);
国家科技支撑计划资助项目(2011BAI02B04)

作者简介:赵双琦(1963-),女,学士,高级实验师,主要从事光电检测、测试计量技术及仪器方面的教学与研究。

E-mail: zhaoshuangqi@bistu.edu.cn

收稿日期:2016-10-31;收到修改稿日期:2016-12-29

平均抑制光学条纹^[13-15]。该方法在很多仪器中被证实有效,但由于增加了系统的复杂度,且一些元件或设备已集成与产品不方便改进或不适合震动,限制了该方法的使用范围;(3)通过镀增透膜和制造楔形角等,尽量避免多束光在检测器上干涉,从根源上消除标准具。以该思路设计的元件已被广泛使用^[16],例如 FC/APC 光纤等,但仍有元件未镀增透膜或设计成楔形角,且被集成在仪器中,不易替换,干扰气体检测,例如多数光电检测器目前仍使用平行窗^[17],此外,即使使用楔形角,可能仍存在漫反射造成的光学条纹;(4)对信号进行滤波、使用双频调制或其它处理方法,抑制光学条纹^[18-20]。但这些方法难以滤除宽度与吸收峰宽近似的光学条纹。

本文中针对现有方法的不足,提出了一种光学条纹补偿方法,可补偿光路中平行界面造成的光学条纹,并在 CO₂ 检测系统中展示、验证了该方法的有效性。该方法与平衡检测方法相比,可补偿气体池、检测器窗等位于分束器后的光学器件造成的光学条纹。与其它方法相比,不需要定制、改进现有元件或震动元件,且抑制效果不受条纹宽度影响。

1 原理

当单色激光透过光路中的一对平行光学界面时,激光在两界面间多次反射产生多束激光。多束激光发生干涉,影响透射光光强波动即为光学条纹。如图 1 所示,一束光透过平行界面后可分成直接透过,两次反射,四次反射等多路透射光。根据法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)标准具干涉仪原理,透射激光等效透过率 t 与界面反射率 r ,界面间光程 S ,波长 λ 相关, t 表达式为^[8]:

$$\begin{cases} t = \frac{1}{1 + \frac{4r}{(1-r)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \\ \delta = 2\pi \cdot \frac{2S}{\lambda} \end{cases} \quad (1)$$

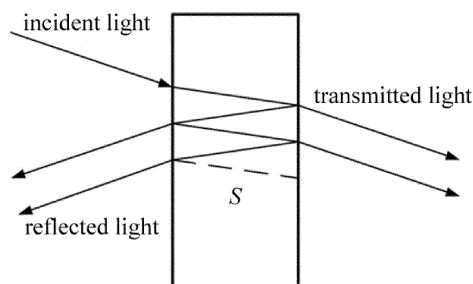


Fig. 1 Schematic diagram of beam passing through parallel interface

大多数激光光谱测量系统受光学条纹影响。通常激光器波长 λ 调谐范围远小于平均波长 $\bar{\lambda}$ 。因此,可

近似认为相位差随激光波长成线性变化,同时 TDLAS 系统中产生光学条纹的介面反射率 R 较小,因此光学条纹常使透射率随波长变化而正弦状波动,使接收到的光强信号在原有的吸收信号上叠加了一个正弦状光学条纹。条纹相邻两峰值点的间隔被称为自由光谱区(free spectral range, FSR),自由光谱区可由波数 ν_e 、波长 λ_e 、频率 f_e 表示,其表达式如下所示^[14]:

$$\begin{cases} \nu_e = \frac{1}{2nl} \\ \lambda_e = \frac{\bar{\lambda}^2}{2nl} \\ f_e = \frac{c}{2nl} \end{cases} \quad (2)$$

式中, n 为折射率, l 为平行界面间距离, $\bar{\lambda}$ 为平均波长, c 为光速。

反射光中同样存在光学条纹,其条纹间隔与透射光相同。由于光从光疏到光密反射存在半波损失,因此反射光与透射光的条纹相位相反。

许多激光光谱测量系统的光路中存在平行的光学介面,如大多数光电检测器窗、一部分激光器窗、气体池窗等^[10,17],并由此导致光学条纹,影响光谱测量。当光路中存在一平行光学介面的情况下,透射光干涉条纹与反射光干涉条纹幅度成正比,条纹间隔相同,条纹相位相反。可认为反射光光学条纹是透射光光学条纹的映射,这也和能量守恒原则相对应。

2 实验系统与条纹补偿方法

构建实验系统如图 2 所示。激光驱动器(Light-wave, LDC3908)驱动分布反馈式激光器(古河),激光波长在低频调谐(16Hz)的基础上叠加一个高频正弦调制(16kHz)。出射激光经过分束器后穿程长为 2m 的怀特池(Infrared Analysis 16-V),由光电检测器(photoelectric detector, PD) PD₁ 接收(thorlabs, PDA-10ECS),再经过锁相放大器解调后得到二次谐波信号(2f 信号),将锁相放大器 X 通道输出信号上传至电脑进行进一步分析。与常规 TDLAS 系统不同的是,该系统中加入了额外的一个光电检测器 PD₂,测量后向反射光学条纹用于补偿。为了研究光学条纹的补偿方法,在怀特池中使用了原配的平行窗,以产生光学条纹并观测。另一片使用了定制的楔形窗以尽量简化系统中的光学条纹。

激光器波长的有效调谐范围约为 1579.7nm ~ 1580.25nm,覆盖了一条中心波长为 1580.04nm 的 CO₂ 吸收谱线。根据光学条纹映射特性,提出的光学条纹抑制方法,可使用 PD₂ 对应的 2f 信号补偿光路中

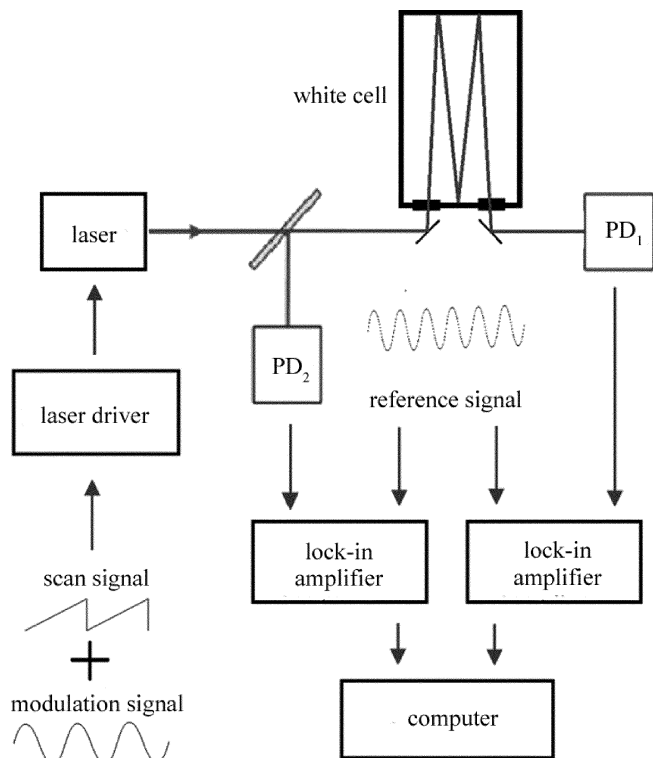


Fig. 2 Experimental setup

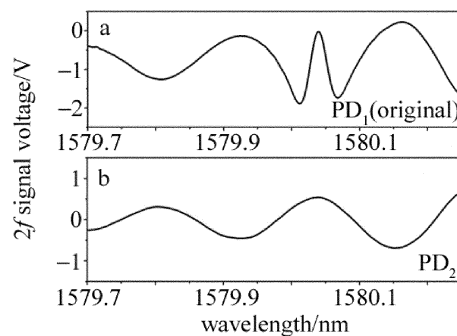
平行介面产生的光学条纹,得到更真实的 CO_2 吸收信号 V_{CO_2} ,如下所示:

$$V_{\text{CO}_2} = V_{\text{PD}_1} - kV_{\text{PD}_2} \quad (3)$$

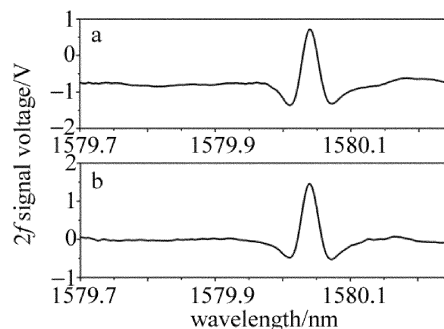
式中, V_{PD_1} 为 PD_1 对应的 $2f$ 谐波信号, V_{PD_2} 为 PD_2 对应的 $2f$ 信号; k 为常数,与分束器透射率、反射率及怀特池窗反射率相关,可根据谐波信号测量结果得出最优值。

3 实验结果与分析

以 CO_2 测量系统为实例展示光学条纹补偿方法。在室温条件下(21°C),将体积分数为 0.01 的 CO_2 通入气体池,并测量气体吸收信号。由 HITRAN 数据库可知, CO_2 在 1580.04nm 处有一个较强吸收峰。将 2s 内的锁相放大器输出信号,经 32 次平均并完成波长转换,两个检测器对应的二次谐波信号如图 3 所示。 PD_1 谐波信号可检测到较强吸收峰,中心峰值为 1580.04nm ,与数据库中光谱吸收线对应。通常 TDLAS 系统中常使用未做补偿的 PD_1 谐波信号(见图 3a)进行处理,并得到待测气体信息。然而 PD_1 信号中含有较强光学条纹,对气体吸收线的线形拟合造成了严重的干扰。该条纹间隔约为 240pm ,根据(2)式计算其对应的标准具两介面光程差约为 5mm ,与气体池透射窗厚度对应。 PD_2 谐波信号中存在光学条纹(见图 3b),且与 PD_1 谐波信号中的条纹反相。因此,可按(3)式对 PD_1 对应的 $2f$ 信号进行光学条纹补偿。根据 $1579.7\text{nm} \sim$

Fig. 3 The second harmonic signal
a— PD_1 (original) b— PD_2

1579.9nm 无气体吸收范围内谐波信号确定 k 值。经拟合测试,当 $k = 1.46$ 时,补偿后的背景信号最平坦,因此令 $k = 1.46$ 。补偿后的信号如图 4a 所示,与图 3a 中补偿前的信号相比,光学条纹被大幅抑制。

Fig. 4 a—the compensated $2f$ signal b—the standard $2f$ signal

光谱测量中常使用拟合相关度来表征检测信号的真实性的。向怀特池中充入氮气测得背景信号,将 PD_1 谐波信号与背景信号相减得出 CO_2 标准吸收信号如图 4b 所示。对补偿后的 $2f$ 信号与标准气体吸收信号进行最小二乘拟合,两信号线形相似,拟合相关系数 $R^2 = 0.9989$,这一结论初步证明了光学条纹补偿方法的有效性。

光学条纹漂移是影响 TDLAS 系统稳定性的重要因素。因此,为了进一步验证光学条纹补偿方法的有效性,对光学条纹漂移情况下补偿效果进行了研究。使用怀特池配套的电加热器对怀特池加热,室温由 21°C 升至 40°C ,每隔 1min 记录一组条纹信号,持续 10min,共得到 10 组数据。在加热期间持续通入 21°C (室温)下体积分数为 0.01 的 CO_2 气体,以最大程度保证待测气体吸收信号线形不变。

温度升高使透射窗折射率上升,间距增大,玻璃两介面间光程增大。因此光学条纹随温度升高向右移动。通过扣背景去除光学条纹的方法失效,且 PD_1 对应的吸收线与标准线形差距较大,如图 5 所示。但在温度变化过程中, PD_2 光学条纹与 PD_1 光学条纹相位相反,幅值成比例,依然符合光学条纹映射理论。

将光学条纹补偿前(PD_1 信号)与补偿后的 $2f$ 信

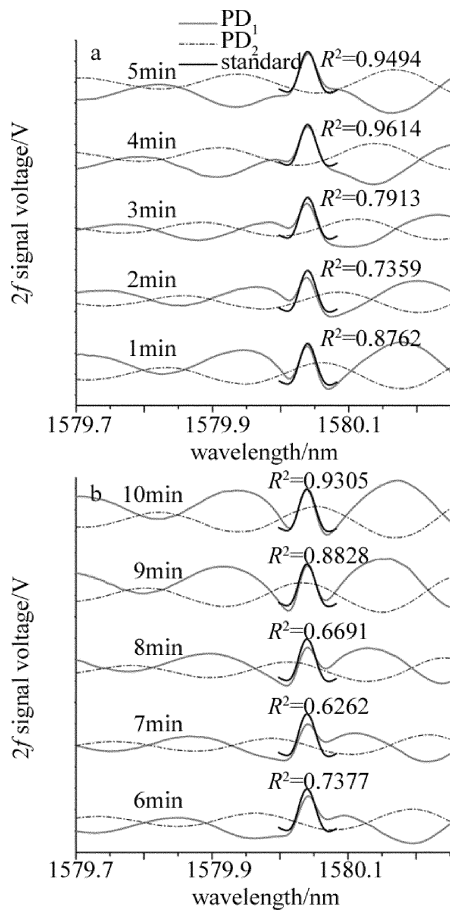


Fig. 5 2f signal during optical fringes drifting

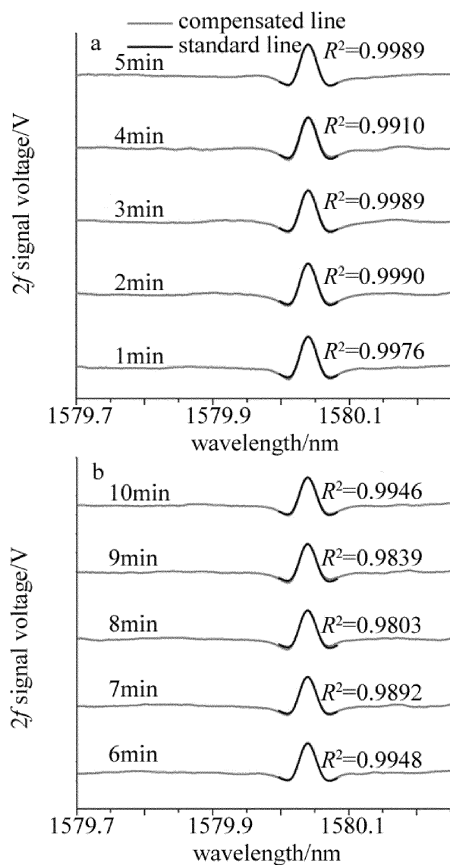


Fig. 6 Fitting curve of the compensated 2f signal and the standard 2f signal

号分别与标准信号 CO₂ 信号进行一次线性拟合并以一次项系数计算测量 CO₂ 体积分数。补偿前的 CO₂ 体积分数测量值漂移较大,标准差为 1260×10^{-6} ,平均相关系数仅为 0.8298,难以达到高精度测量要求。补偿后的信号如图 6 中灰线所示,与图 5 中灰线所示的补偿前信号相比,光学条纹幅度明显减小,平均相关系数提升至 0.9934;体积分数测量值相对稳定,标准差为 48.5×10^{-6} 。因此可认为,在温度变化的情况下,该方法仍可有效补偿漂移的光学条纹。

4 结论

提出了一种光学条纹的补偿方法,可抑制光路中平行介面产生的光学条纹。当光路中存在平行介面时,透射光干涉条纹与反射光干涉条纹幅度成正比,条纹间隔相同,条纹相位相反,可认为反射光光学条纹是透射光光学条纹的映射。以 CO₂ 检测系统为实例,对气体池窗造成的光学条纹进行补偿,展示了补偿方法的使用过程及效果。实验结果表明,该方法可大幅补偿系统中的光学条纹,补偿后的测量信号与标准气体吸收信号拟合相关系数为 0.9989。即使在光学条纹漂移的情况下,该方法仍可有效补偿光学条纹,使补偿后的测量信号与标准气体吸收信号的拟合相关系数由 0.8298 提升至 0.9934。CO₂ 测量体积分数标准差由 1260×10^{-6} 降低至 48.5×10^{-6} 。

实验结果表明,本文中提出的方法适合用于抑制检测器窗、气体池窗或其它已集成于系统的光学元件造成的光学条纹,在 TDLAS 领域具有较大的应用价值。

参 考 文 献

- [1] LI M X, LIU J G, KAN R F, *et al.* Design of real-time measurement of atmospheric CO and CH₄ based on tunable diode laser spectroscopy system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 389-395 (in Chinese).
- [2] CHEN X, KAN R F, YANG Ch G, *et al.* Precise measurement of air pressure using tunable diode laser absorption spectroscopy technology [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(4): 719-723 (in Chinese).
- [3] XIONG B, DU Zh H, LIU L, *et al.* Hollow-waveguide-based carbon dioxide sensor for capnography[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(11): 111201.
- [4] REID J, LABRIE D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory [J]. *Applied Physics*, 1981, B26(3): 203-210.
- [5] LAN L J, DING Y J, JIA J W, *et al.* Theoretical and experimental study of measuring gas temperature in vacuum environment using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(8): 83301 (in Chinese).
- [6] HE J F, KAN R F, XU Zh Y, *et al.* Derivative spectrum and concentration inversion algorithm of tunable diode laser absorption spectroscopy

- py oxygen measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 280-285 (in Chinese).
- [7] ZHANG Sh F, LAN L J, DING Y J, *et al.* Theoretical and applied researches on measuring line width in wavelength modulation spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 64(5): 053301 (in Chinese).
- [8] WERLE P. Accuracy and precision of laser spectrometers for trace gas sensing in the presence of optical fringes and atmospheric turbulence[J]. *Applied Physics*, 2011, B102(2): 313-329.
- [9] KLUCZYNSKI P, GUSTAFSSON J, LINDBERG A M, *et al.* Wavelength modulation absorption spectrometry—an extensive scrutiny of the generation of signals[J]. *Spectrochimica Acta*, 2001, B56(8): 1277-1354.
- [10] XIONG B, DU Zh H, LI J. Modulation index optimization for optical fringe suppression in wavelength modulation spectroscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(11): 113104.
- [11] CHEN J Y, LIU J G, ZHANG Y J, *et al.* Autobalanced detection based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 350-353 (in Chinese).
- [12] PERSSON L, ANDERSSON F, ANDERSSON M, *et al.* Approach to optical interference fringes reduction in diode laser absorption spectroscopy[J]. *Applied Physics*, 2007, B87(3): 523-530.
- [13] HODGKINSON J, MASIANO D, TATAM R P. Gas cells for tunable diode laser absorption spectroscopy employing optical diffusers. Part 1: single and dual pass cells [J]. *Applied Physics*, 2010, B100(2): 291-302.
- [14] WEBSTER C R. Brewster-plate spoiler: a novel method for reducing the amplitude of interference fringes that limit tunable-laser absorption sensitivities [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1985, B2(9): 1464-1470.
- [15] SILVER J A, STANTON A C. Optical interference fringe reduction in laser absorption experiments[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(2): 1914-1916.
- [16] AHLBERG H, LUNDQVIST S, SHUMATE M S, *et al.* Analysis of errors caused by optical interference effects in wavelength-diverse CO₂ laser long-path systems[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(22): 3917-3923.
- [17] HANGAUER A, CHEN J, STRZODA R. Wavelength modulation spectroscopy with a widely tunable InP-based 2.3 μm vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Optics letters*, 2008, 33(14): 1566-1568.
- [18] CASSIDY D T, REID J. Harmonic detection with tunable diode lasers-two-tone modulation [J]. *Applied Physics*, 1982, B29(4): 279-285.
- [19] CARLISLE C B, COOPER D E, PREIER H. Quantum noise-limited FM spectroscopy with a lead-salt diode laser[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(13): 2567-2576.
- [20] MENG Y, LIU T, LIU K, *et al.* A modified empirical mode decomposition algorithm in TDLAS for gas detection [J]. *Photonics Journal, IEEE*, 2014, 6(6): 1-7.