

文章编号: 1000-5862(2018)06-0639-05

高精度 F-P 干涉具在 CO₂ 浓度反演中的研究

马 丹

(长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130000)

摘要: 为了对大气中 CO₂ 浓度的分布进行高精度的实时监测, 并与被测区域 2 维图像构成光谱数据立方, 设计了一种基于高精度数字控制的 F-P 干涉系统. 通过对 F-P 两镜间微位移的高精度数字控制, 实现光程差的周期性扫描, 从而得到光谱数据立方. 通过仿真分析了控制命令与压电信号的时序逻辑, 并对光谱抽样进行了模拟计算. 实验中系统的光谱调制带宽为 761.52 ~ 762.56 nm, 光谱分辨率为 0.01 nm, 测试 CO₂ 浓度范围为 10 ~ 400 ppm, 由 TSI-7575 型高精度 CO₂ 检测器标定. 结果显示: 该系统相对误差的平均值为 1.04%, 绝对误差平均值为 1.52 ppm, 符合设计要求.

关键词: F-P 干涉仪; CO₂ 浓度监测; 高精度控制; 光谱数据立方

中图分类号: O 433.1 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2018.06.16

0 引言

近年来, 全球出现的极端天气现象越发频繁, 在我国今年夏天多个地区突破了历史最高气温的记录, 反映了全球变暖问题日渐严重, 其根本原因是温室气体的不断增加, 而其中温室气体的主要成分是 CO₂^[1-2]. 自工业化社会以来, 人类每年向大气中排放的 CO₂ 超过 300 亿 t, 全球 CO₂ 浓度从 280 ppm 增加到了 370 ppm, 仅本世纪末全球平均气温将提高 1.9 ~ 4.6 °C. 面临如此严峻的形势, 使得对 CO₂ 浓度的监测成为了各国研究的热点^[3-5].

研究大气中 CO₂ 浓度最为有效的方法是通过 O₂A 带的测量进行反演分析, 是实现 CO₂ 源与汇定量分析的主要途径^[6]. 2002 年, 欧空局的 ENVISAT 卫星采用傅里叶光谱仪 MIPAS 最高可实现 0.2 nm 的光谱分辨率^[7]; 2003 年, 加拿大航天局的 SCISAT 卫星携带的 ACE 光谱仪分辨率达 0.4 nm^[8]; 2004 年, 美国 NASA 的 AURA 卫星携带的 TES 光谱仪分辨率为 0.2 nm^[9]; 2009 年, 日本的温室气体观测卫星 (GOSAT), 最优光谱分辨率为 0.03 nm^[10]. 2014 年, 美国的轨道碳观测卫星 2 (OCO-2) 中的光谱仪光谱分辨率达 0.014 nm^[11]. 以

上卫星携带的光谱仪均可用于对大气中 CO₂ 浓度进行监测, 其测试波段采用的是 O₂A 带 (760 nm 附近)^[12-14].

实现对温室气体总量、浓度等的探测对我国气象、气候变化的预测具有重要意义. 同时, 由于当前全球 CO₂ 总量、分布等资料来源掌握在少数发达国家手中, 如果我国具备全球 CO₂ 循环模式监控能力, 必然大幅提升在相关国际事物中的话语权, 可以更好地维护国家利益^[15]. 故研究具有对大气中 CO₂ 浓度精确、实时、全面监测能力的光谱仪具有重要意义. 本文的主要研究内容是设计验证一种高精度 F-P 干涉 (Fabry-Perot Interference) 系统, 用于大气中 CO₂ 浓度的监测.

1 高精度 F-P 干涉系统设计

高精度 F-P 光谱调制干涉系统如图 1 所示. 系统主要由 3 大部分组成: 前置光学系统、光谱调制系统和数据处理系统. 前置光学系统用于对被测区域的光信号进行收集、整形、准直等, 从而保证入射光的平行度及稳定性; 光谱调制系统由 F-P 干涉具、成像透镜以及面阵 CCD 构成. 通过高精度数字控制模块驱动压电制动器形成周期性位移变化, 从而实现扫描动镜 (静镜固定不动), 最终达到调制 F-P 腔长

收稿日期: 2018-04-27

基金项目: 国家自然科学基金 (61703055) 资助项目.

作者简介: 马 丹 (1984-), 女, 吉林长春人, 讲师, 主要从事数据库设计、Java 程序设计和网络安全的研究. E-mail: madan-nuc@sina.com

的效果,实现光谱调制的目的.在该区域(点方框)中,为了保证F-P干涉具对入射光测试的精度,要求密封且恒温控制,减少空气流动或温差造成的测量误差.数据处理系统由CPU控制高精度数控模块,为压电制动器提供驱动信号,同时,CPU接收由高速数据采集模块导入的干涉条纹数据信息.干涉条纹经过滤波降噪、傅氏变换、光谱标定等一系列处理后得到目标光对应波段(O₂A带)的光谱辐强度信息,再通过反演算法计算待测区域的CO₂浓度值.由此可见,其浓度测试精度主要取决于光谱扫描的精细程度,即压电驱动动镜微位移控制精度的能力.

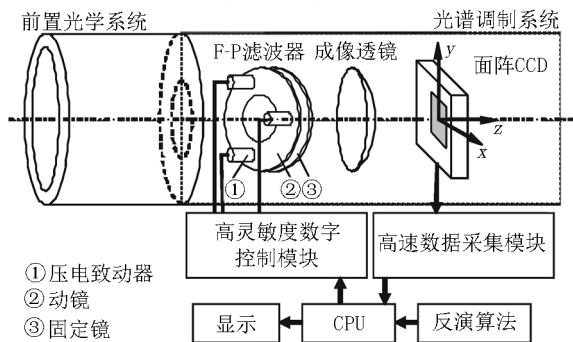


图1 高精度F-P光谱调制干涉系统

2 理论分析

2.1 F-P干涉模块数控调制机理

F-P干涉模块利用多光束干涉实现,设动镜和静镜的反射率分别为 R_2 和 R_3 ,其吸收系数分别为 A_2 和 A_3 ,则F-P干涉具的透射率可表示为

$$T = \frac{(1 - R_2 - A_2)(1 - R_3 - A_3)}{(1 - \sqrt{R_2 R_3})^2 + 4\sqrt{R_2 R_3} \sin^2(\delta/2)}$$

其中 δ 表示相邻光通过F-P产生的相位差,其可以表示成

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda}nd(t)\cos\theta,$$

其中 λ 为波长, $d(t)$ 为随时间 t 变化两镜间的距离函数, θ 为入射光穿过F-P平板时的折射角.对于F-P而言,其光程差为

$$\Delta = 2nd(t)\cos\theta,$$

则F-P的光谱分辨率有

$$\nu_{F-P} = 1/(2\Delta) = 1/(4nd(t)\cos\theta).$$

由此可见,对通过高精度压电制动器控制F-P干涉具中动镜的微位移扫描可以实现对待测光谱范围(O₂A带)的扫描,从而获得用于求解CO₂浓度的精确参考光谱信息,这也是F-P光谱仪对光波带宽限制起的作用.

2.2 CO₂浓度的反演

由Lambert-Beer定律可知,设初始光强为 I_0 ,透射光强为 I_t ,吸收光程长度为 l ,吸收系数为 α ,则待测气体浓度可表示为

$$c_{CO_2} = \frac{1}{\alpha l} \lg\left(\frac{I_0}{I_t}\right).$$

在大气CO₂的检测过程中,初始光强为太阳辐射光强,透射光强为到达地表后的光强,两者均可准确测量,而对于CO₂而言,吸收系数是常数,因此影响CO₂浓度计算的主要是大气中实际光程的求解.采用O₂A带作为参考光谱段最大的优势是其可以精确地求解被测光路中的氧分子量,从而提供反演CO₂浓度所需的光程信息.故通过精确反演O₂A带的光谱强度再加上CO₂吸收峰1.61 μ m处的光强吸收测试数据就能实现大气中CO₂浓度的高精度反演了,O₂A带的光谱分布如图2所示(数据源于HITRAN).

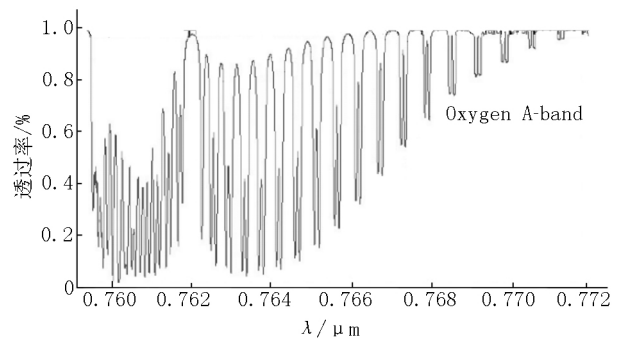


图2 O₂A带的透射率曲线

通过图2可看出,在O₂A带上的氧分子吸收线具有十分明显的特征,高吸收与高透射交替产生,所以控制F-P调制光谱使精细光谱实现有效对准可大幅提高系统光谱测试的精度.本文的重点是研发一种可实现高精度光谱分辨的电控调制系统,再配合2次成像系统实现在O₂A带上基于法布里-珀罗干涉技术对大气中CO₂来源、分布和汇集的实时2D成像监控.

3 光谱数据获取

对于本系统而言,压制动器的控制精度是光谱调制能力的核心,对于微位移量的控制精度直接决定了系统光谱调制的精度及稳定性.控制命令与压电信号的仿真数据如图3(a)所示,高精度数控模块的步进压电信号与控制命令基本重合,在10s内从0 μ m处变化到5.0 μ m处,每秒的位移改变量是0.50 μ m.对于F-P干涉系统而言,其对应的光程

差被调制,从而产生干涉环的变化.

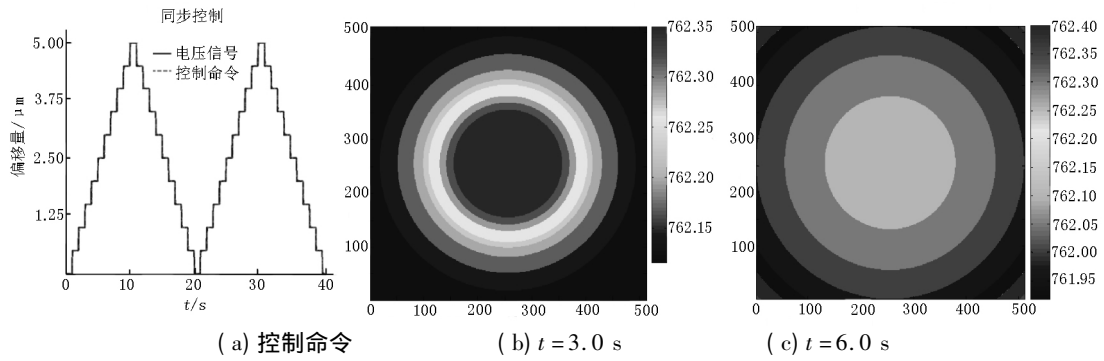


图 3 控制命令与光谱抽样仿真值

采用前置光学系统收集待测光信息,再由高精度数控模块通过压电制动器实现对光程变化的扫描,最终在 CCD 上干涉.由于系统在一个周期内的每个调制时刻对应的光程差均不相同,所以每个 CCD 像元随时间变化的强度信息为该像元位置上的光谱调制曲线.采用 CCD 的像元数为 500×500 ,单个像元尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$,则采用基于压电制动器实现光谱抽样如图 3(b) 和图 3(c) 所示.

由于压电制动器的作用使系统动镜产生了微位

移,从 $3.0 \sim 6.0 \text{ s}$ 的时间内位移由 $1.52 \mu\text{m}$ 改变为 $3.14 \mu\text{m}$,每秒产生约 $0.51 \mu\text{m}$ 的步进扫描量,从而其对应的干涉条纹发生变化,对应的变化结果如图 4 所示.可以看出,采用高精度数控模块进行步进扫描可以得到对光谱扫描的调制效果.由此,只需要通过将整个时间周期内每个像元点的强度数据重新组合排列,就能得到每一像元点的光谱分布信息.最后与 2 次成像系统构成光谱成像数据立方.

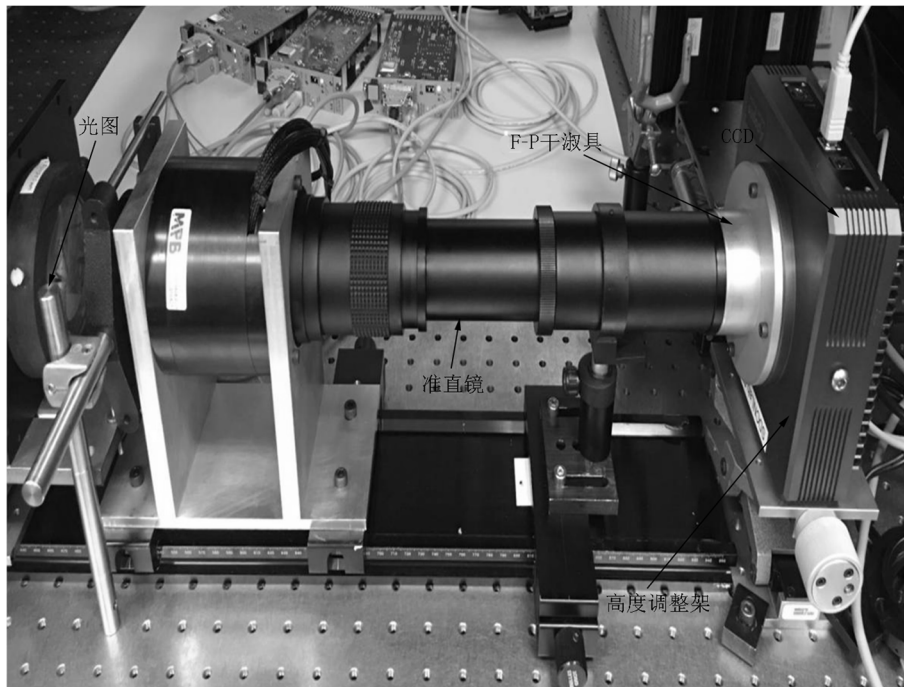


图 4 系统结构

4 实验

为了模拟探测大气中 CO₂ 浓度,采用能等比例缩放的形式进行实验,将激光有效功率与测试距离进行相应比例的衰减.光谱调制系统的自由光谱调制带宽为 $761.52 \sim 762.56 \text{ nm}$,光谱分辨率 0.01 nm ,

调制周期 100 ms .同时,测试系统如图 4 所示,在被测位置处放置高精度 CO₂ 检测仪完成测试数据的对比.

4.1 干涉条纹数据提取与光谱反演

在本系统中,每一个像元点上都包含了一个随时间变化的光强调制信号,从而整个采集过程构成一组携带光谱信息的数据立方.限于篇幅,给出了在

仿真中模拟的2个时刻的干涉条纹采样数据进行对比,如图5所示。

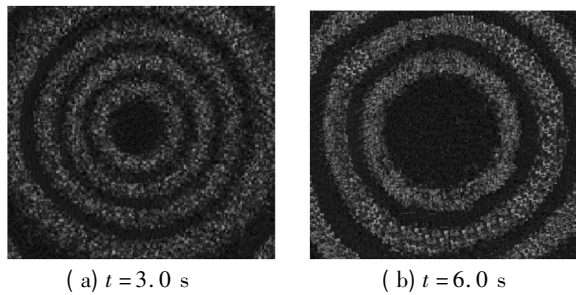


图5 系统及干涉图样

由图5可知,当系统中F-P干涉具被调制时,随着压电制动器的控制使F-P两镜间的距离发生周期性变化,从而使光程差发生相应的改变,最终,在CCD上可以得到变化的干涉环。其中,对每个像元

点而言,不同时刻对应的光强度值又是不相同的,当光谱调制遍历一个周期以后,将每个像元点在整个时间段上的强度变化重新组合成新的数据组,就能获得该空间点上的光谱分布图了。将所有空间点均按照此方法处理后得到全图像的光谱数据立方,再与待测区域的2维空间图像融合构成多光谱图像,其中任意空间点的CO₂浓度均是可解析的。

4.2 CO₂浓度的反演

实验采用化学反应的方法配置不同浓度的CO₂样气,浓度范围为10~400 ppm,每次测量前采用美国TSI公司的7575型高精度CO₂检测仪进行测试标定(其检测精度为0.1 ppm,最大量程5 000 ppm)。然后采用本系统进行测试,与其测试数据进行对比,实验数据如表1所示。

表1 CO₂浓度反演数据及误差

CO ₂ 浓度 / ×10 ⁻⁶		误差 / %	CO ₂ 浓度 / ×10 ⁻⁶		误差 / %
TSI-7575	本系统		TSI-7575	本系统	
10.1	10.9	7.92	79.8	80.7	1.12
19.8	21.1	6.57	90.0	90.8	0.88
30.2	29.4	2.65	100.2	101.3	1.10
39.9	41.2	3.26	150.4	152.1	1.13
50.1	51.3	2.40	200.2	198.1	1.01
60.3	61.2	1.49	300.4	298.5	0.63
70.2	69.2	1.45	399.7	397.9	0.56

由于本系统拟应用于大气CO₂浓度检测,故测试上限定在400 ppm。但从其测试数据可以看出,在CO₂浓度较低时,系统测试误差相对较大,而随着CO₂浓度的增大测试误差逐渐降低。当CO₂浓度低于50 ppm时,相对误差的平均值为4.56%,当CO₂浓度超过50 ppm后,相对误差的平均值趋于稳定,约为1.04%。而本系统与标准测试仪器的测试数据相比,绝大部分测试值的绝对误差小于2.0 ppm,平均绝对误差为1.52 ppm,符合反演大气CO₂浓度分布的设计需要。

5 结论

本文利用O₂A带为CO₂浓度检测提供精确参考光程信息的特点,设计了基于高精度F-P干涉系统,利用高精度数字控制技术实现对压电制动器的步进扫描,从而实现了光程差的微米级驱动,使在光谱调制区间内光谱分辨率达到0.01 nm,大大提高了CO₂浓度反演的精度。通过仿真分析和模拟实验验证了系统的可行性,该系统对高精度大气CO₂

浓度监测具有重要参考意义。

6 参考文献

- [1] 张佳薇,范浩,李师轮,等.近红外QEPAS痕量CO₂检测系统优化研究[J].激光杂志,2017,38(10):24-27.
- [2] 远双阳,苟瑞君,张楠.基于双差分的高精度甲烷浓度探测系统[J].江西师范大学学报:自然科学版,2016,40(5):465-468.
- [3] 李杰,朱京平,齐春,等.大孔径静态超光谱全偏振成像技术[J].红外与激光工程,2014,43(2):574-578.
- [4] 李相贤,高闽光,徐亮,等.基于OP-FTIR法监测城市交通排放CO、CO₂、N₂O和CH₄气体[J].红外技术,2011,33(8):473-476,482.
- [5] Neelam Gupta, Songsheng Tan, Dennis R Zander. Micro-electromechanical systems-based visible, near infrared Fabry-P6rot tunable filters using quartz substrate[J]. Optical Engineering, 2012, 51(7):74007.
- [6] 江小峰,林春,谢海鹤,等.白光干涉解调光纤MEMS压力传感器[J].光子学报,2014,43(10):193-197.
- [7] Rami Mannila, Antti Nasila, Kai Viherkanto, et al. Spectral imager based on Fabry-P6rot interferometer for Aalto-1 nanosatellite [EB/OL]. [2018-07-11]. <http://proceed->

- ings. spiedigitallibrary.org/data/Conferences/SPIEP/76181/887002.pdf.
- [8] 廉玉生,廖宁放,吕航,等.一种光谱分辨率可调的新型空间调制傅里叶变换光谱仪[J].光谱学与光谱分析,2014,34(11):3136-3140.
- [9] Fu Anbang,Zhang Huaidong,Zhang Xinyu,et al. An electrically controlled liquid crystal Fabry-Perot hyperspectral imaging chip in mid-infrared region [EB/OL]. [2018-07-11]. <http://www.spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2034687>.
- [10] 杜述松,王咏梅,陶然.多光束干涉光谱成像技术[J].光学学报,2013,33(8):310-316.
- [11] Vladislav Jovanov,Eerke Bunte,Helmut Stiebig,et al. Transparent Fourier transform spectrometer [J]. Optics Letters 2011,36(2):274-276.
- [12] 陈健,高慧斌,王伟国,等.超分辨率复原方法相关原理研究[J].中国光学,2014,7(6):897-910.
- [13] Massimo Zucco,Marco Pisani,Valentina Caficato,et al. A hyperspectral imager based on a Fabry-Perot interferometer with dielectric mirrors [J]. Optics Express 2014,22(2):1824-1834.
- [14] 刘波,朱永,陈建君,等.新型傅里叶变换光谱仪反射镜倾斜容限分析及实验[J].光子学报,2013,42(3):315-319.
- [15] Liu Fengwei,Wu Yongqian. Simultaneous phase-shifting interferometry study based on the common-path Fizeau interferometer [EB/OL]. [2018-07-11]. 10.1117/12.2070972.

The Study on the High Accuracy F-P Interferometer in the Retrieval of CO₂ Concentration

MA Dan

(College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin 130000, China)

Abstract: In order to carry out high-precision real-time monitoring of the distribution of CO₂ concentration in the atmosphere and form a spectral data cube with two-dimensional images of the measured area, a F-P interference system based on high-precision digital control is designed. The periodic scanning of the F-P between the two mirrors is performed by high-precision digital control. At the same time, it realizes the periodic scanning of the optical path difference. Finally, the spectral data cube can be obtained. Through the simulation, the piezoelectric signal with the control command and the timing logic are analyzed, and the spectral sampling is simulated. In the experiment, the spectral bandwidth of the system is 761.52-762.56 nm, the spectral resolution is 0.01 nm, and the CO₂ concentration is in the range of 10-400 ppm. The test data is calibrated by the TSI-7575 high precision CO₂ detector. The experimental results show that the average error of the system is about 1.04%, the absolute error is 1.52 ppm, and it is in line with the design needs.

Key words: F-P interferometer; CO₂ concentration monitoring; high precision control; spectral data cube

(责任编辑:冉小晓)