文章编号：1672-8785(2018)06-0021-06

基于宽频光源-FP 腔的大气 CO_2 检测系统误差分析

成　龙[1,2,3]　丁　雷[1,2]

(1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室，上海　200083；
2. 中国科学院上海技术物理研究所，上海　200083；
3. 中国科学院大学，北京　100049)

摘　要：介绍了由宽频光源和法布里-珀罗(Fabry-Pérot，FP)谐振腔组成的 CO_2 检测系统。结合常见的主动光学系统误差分析方法，对系统的各个误差项进行了定量化分析。系统误差来源于光源能量波动、环形器串扰、FP 腔谱线变动和探测器噪声四个方面。通过建模计算了各独立误差项对差分信号数值的影响，确定了 4 项主要的系统误差。传统大气检测误差分析将硬件系统误差直接关联到浓度数据上，本文误差分析方法把硬件误差和反演算法误差剥离，对于提高系统的工作能力有更好的指导意义。

关键词：CO_2 检测；光纤 FP 滤波器；宽频光源；误差分析；主动光学

中图分类号：TN958.98　**文献标志码**：A　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2018.06.004

Error Analysis of CO_2 Detection Based on Broadband Light Source and FP Cavity

CHENG Long[1,2,3], DING Lei[1,2]

(1. *Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*;
2. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A CO_2 detection system based on a broadband light source and a Fabry-Pérot resonant cavity is presented. By combining with other active optical system error analysis methods, the error terms of the system are quantitatively analyzed. The main error source of the system includes four parts: the energy fluctuation of the light source, the crosstalk of the circulator, the change of the FP cavity spectral line and the noise of the detector. By modeling and calculating the influences of independent error items on the difference signal value, four main systematic errors are determined. In the error analysis of traditional atmospheric detection, the hardware system error is related directly to the concentration data. Instead, in the error analysis proposed, the hardware error and the inversion algorithm error are stripped. This method is of better guiding significance to the improvement of system operation ability.

Key words: CO_2 detection; fiber Fabry-Pérot filter; broadband light source; error analysis; active optics

收稿日期：2018-04-04

作者简介：成龙(1989-)，男，博士生，主要从事大气 CO_2 检测、光学设计工作。
E-mail：chenglong@shanghaitech.edu.cn

0 引言

人类活动中，化石燃料的燃烧会造成 CO_2 排放量激增，地球上重要“碳汇”的森林资源急剧减少，直接导致大气中 CO_2 浓度增加。图 1 的基林曲线[1]给出了自 1958 年以来大气中的 CO_2 浓度数据。从图中可见，近 50 年 CO_2 浓度增加量超过 70 ppm(百万分之一)。2017 年，基林曲线首次突破 410 ppm，且增长速度仍在提高。CO_2 浓度和全球气候变化之间有密切关联。实现 CO_2 全球范围“源-汇”观测，对研究人类活动和气候变化之间的关系有重要的意义。

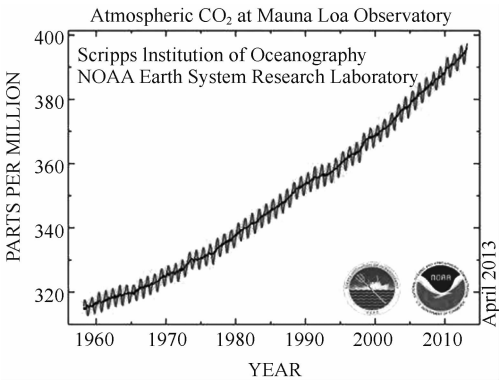

图 1 基林曲线

通过卫星进行 CO_2 柱浓度检测，可以大大提高数据的时间和空间覆盖率。目前在轨的 CO_2 专用检测卫星包括日本的 GOSAT(Greenhouse Gases Observation Satellite)卫星[2]、美国的 OCO-2(Orbiting Carbon Observatory-2)卫星[3]和中国的碳卫星[4]，它们都用高光谱技术实现 CO_2 探测。NASA 在 2007 年提出的 ASCENDS(Active Sensing of CO_2 Emission over Night, Day and Seasons)项目[5]，则是通过积分路径差分吸收法(Integrated Path Differential Absorption，IPDA)探测大气 CO_2 柱浓度，工作原理如图 2 所示。系统使用自身光源，避免了对太阳光的依赖。

本文介绍了基于宽频光源和 FP 腔滤波器的 CO_2 检测系统，从系统组成和探测原理出发，对系统误差展开分析。系统误差分为四个独立部分：光源、光纤环形器、FP 腔和探测器。通过逐一建模计算出各误差项。传统误差分析法通过误差项仿真获得误差项对应的大气浓度误差，忽略了后期反演算法和大气模型对探测精度的影响。本文把系统探测误差和数据处理误差剥离开，有助于提高系统的设计水平。

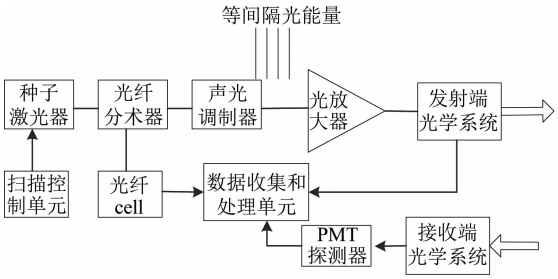

图 2 ASCENDS 项目中 IPDA 探测原理框图

1 系统介绍

基于宽频光源和 FP 腔的大气 CO_2 系统由发射端和接收端两部分组成，原理框图如图 3 所示。

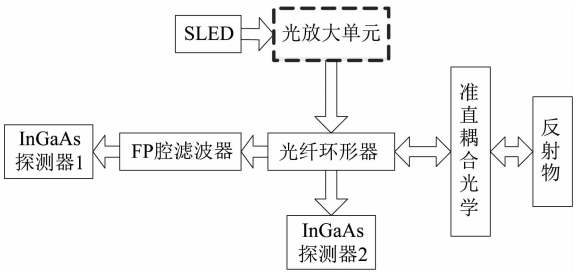

图 3 系统总体原理框图

系统的工作流程是，SLED 光源提供宽波段的光能量，光进入光放大结构(图 3 中虚线框表示实验室环境下光程短，可以不使用)，放大之后的光进入光纤环形器。光纤环形器提供两条光路：发射端到大气和大气到接收端。前一路保证光能量输出到大气环境中，后一路保证大气环境的反射光进入接收端系统。光纤环形器接收到的光又被分为两个光通道，其中一路通过光纤 FP 腔滤波器进入探测器，另一路直接进入探测器。设计光纤 FP 腔滤波器透过率函数，使其尽可能和 CO_2 透过率匹配。两通道信号之间的差分可以有效降低系统工作过程中对 CO_2 柱浓度变化不敏感的因素的

影响[6]。

本系统使用宽频 SLED 光源和 FP 腔滤波配合工作。在传统差分吸收激光雷达系统中，光源一般包括多个单频光源(或可调谐光源)，用于提供多个吸收峰值/谷值的信号光，每一个频率对应一个接收端。每一个频率通道都需满足光强度和频率稳定性[7]的要求。这些都进一步增加了系统的结构复杂度和功耗。宽频 SLED 光源可以同时提供谱段内多条峰值/谷值波长的光，而 FP 腔滤波可以选出对 CO_2 柱浓度敏感的波长通道，并进行信号累加，从而提高信号光强度，简化系统结构，进一步降低对光源功率的要求。

2 误差分析

在系统组成和探测方式上，宽频光源－FP 腔滤波系统和传统的差分吸收雷达系统有较大区别。通过综合考虑系统组成和探测原理，可以把系统误差的来源分为四个部分。

2.1 发射端误差

发射端误差主要来自光源 SLED 和光放大器。实验室条件下不使用光放大器，只考虑光源 SLED 引起的误差。光源误差以光源输出能量的抖动来表示。SLED 的能量输出如图 4 所示，典型能量抖动放大的自发辐射(Amplified Stimulated Emissions，ASE) Ripple 为 0.081 dB。

由于差分结构同时接收两个通道的光能量，光源单个波长辐射能量的波动会通过差分直接约去，对差分信号的大小没有影响。仅考虑光源光谱中不同波长的能量抖动值带来的误差。理想状态下，两个通道接收光能量的比值为

$$\delta = S_1 / S_2 \tag{1}$$

式中，S_1、S_2 分别表示理想条件下接收端两个通道上的光能量，δ 表示理想差分信号。

SLED 能量抖动用 Rip 表示为

$$10\lg \frac{S_{\max}}{S_{\min}} = Rip \tag{2}$$

差分信号的误差范围为$[\delta_{\min}, \delta_{\max}]$：

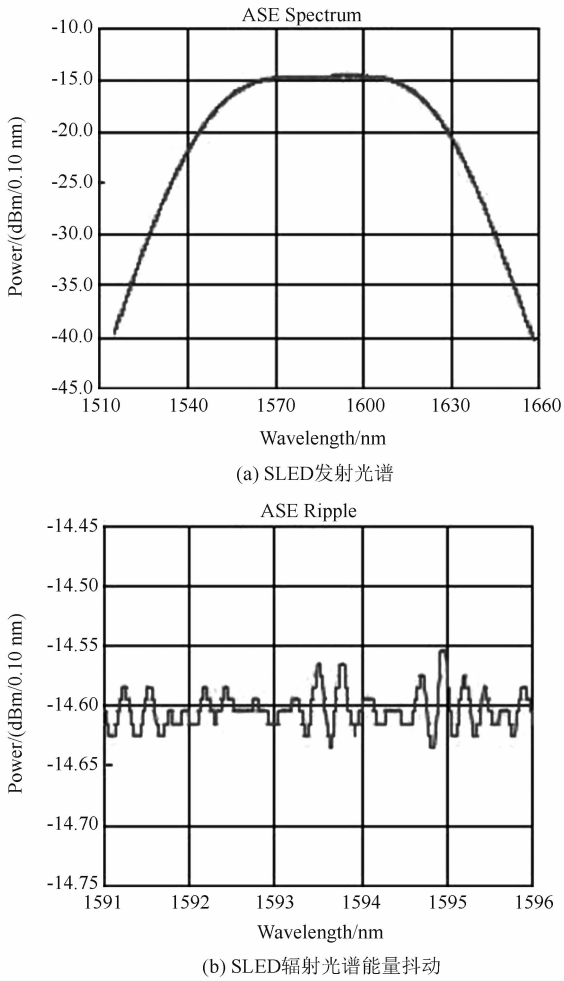

图 4　SLED 的能量输出

$$\delta_{\min} = \frac{S_{1\min}}{S_{2\max}} = \frac{\delta \cdot S_{2\min}}{S_{2\max}} = 10^{-Rip/10}\delta \tag{3}$$

$$\delta_{\max} = \frac{S_{1\max}}{S_{2\min}} = \frac{\Delta\delta \cdot S_{2\max}}{S_{2\min}} = 10^{Rip/10}\delta \tag{4}$$

由于

$$\delta - \delta_{\min} < \delta_{max} - \delta \tag{5}$$

所以系统 SLED 引起的相对误差为

$$\Delta\delta_1 = \frac{(\delta_{max} - \delta)}{\delta} = 10^{\mathrm{Rip}/10} - 1 \tag{6}$$

从上述分析可以看出，光源 SLED 的能量波动会直接影响通道差分结果。光源能量波动数值越大，差分值误差下限就越低，而上限则越高，总体误差相应也越大。在满足光源能量和波长覆盖要求的前提下，应该尽量选择工作波段范围内输出光能量平坦的光源，即光源 Ripple 应该尽可能低一些。

针对光放大单元，可以把 SLED 和光放大器等效为一个大功率光源系统，讨论整个系统的 Ripple 数值，计算方法和上述公式一致。光放大器对于整个系统误差的影响，取决于放大率曲线的波动情况。在系统工作的 1570 nm 波长附近，可以选用光学参量振荡(Optical Parametric Oscillator，OPO)放大器或者掺饵激光光纤放大器。设计过程中，应该尽可能保证放大率曲线的平坦。

2.2 光纤环形器误差

光纤环形器通过双光路结构确保发射端和接收端共用一个光学窗口。三端口光纤环形器的工作情况如图 5 所示。仪器中存在两条光通路，即 port1-port2 和 port2-port3。

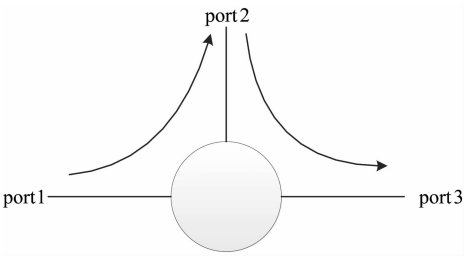

图 5 三端口光纤环形器

光纤环形器对于差分吸收系统的误差影响主要来自两个通路之间的串扰，即发射端光能量不经过 port2 发射到大气环境中，而是直接串扰进入 port3，此时接收端接收到的能量包括从大气中反射回来的光能量 S_{air} 和从发射光路串扰进来的光能量 S_c。经过大气衰减之后的光能量回路就是理想状态下的差分系统。在接收端两个通道上的能量 S_{air1}、S_{air2} 满足：

$$\frac{S_{air1}}{S_{air2}}=\frac{S_1}{S_2}=\delta \tag{7}$$

光纤环形器的串扰值用 CT 表示。当输入光为 S_{in} 时，串扰信号满足：

$$CT=10\lg\left(\frac{S_{in}}{S_c}\right) \tag{8}$$

CT 值越大，串扰效果就越小。串扰信号直接从发射端进入接收端，和大气衰减没有关系。接收端两个通道上的串扰信号差分可表示为

$$\frac{S_{c1}}{S_{c2}}=N\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\tau_{FP}(\lambda)\mathrm{d}\lambda=\delta_0 \tag{9}$$

式中，N 表示两通道之间的分光比，τ_{FP} 表示 FP 腔滤波器的透过率函数。δ_0 与两通道分光比和 τ_{FP} 有关，当外部 CO_2 浓度为 0 时，系统所获得的差分信号值为 δ_0。

串扰影响下，通道差分信号为

$$\frac{S_{air1}+S_{c1}}{S_{air2}+S_{c2}}=\frac{\delta\cdot S_{air2}+\delta_0\cdot S_{c2}}{S_{air2}+S_{c2}}=\delta+(\delta_0-\delta)\frac{S_{c2}}{S_2} \tag{10}$$

相对误差为

$$\Delta\delta_2=(\delta_0/\delta-1)\frac{S_{c2}}{S_2} \tag{11}$$

从上述公式可以看出，串扰带来的误差不仅和系统设计有关，还和系统工作环境中的 CO_2 浓度有关。外部环境中的 CO_2 浓度越低($\delta\rightarrow\delta_0$)，差分信号值误差就越小，显然这种测量方式是没有意义的。

串扰效果越小(CT 数值越高)，在 S_2 基本不变的基础上，S_{c2} 数值也越小，通道差分信号数值也就越接近 δ。所以，应尽可能选择 CT 数值较大的光纤环形器。

从光纤环形器的误差分析还可以看出，系统零输入时的响应值 δ_0 可直接决定光纤环形器串扰带来的误差。当系统两个通道上的滤波情况差别很小时，环形器串扰带来的误差也将变小，此时系统差分信号的动态范围也随之变小，系统对于 CO_2 浓度的灵敏度变低，数据反演算法的难度变大。

2.3 FP 滤波器误差

光纤 FP 腔滤波器是光纤 FP 干涉仪的主要结构。由于光纤 FP 干涉仪对特定的环境参数比较敏感(压强、受力和温度等)，所以常被选为传感器，用于环境参数监测[8]。

光纤 FP 腔透过率谱线的误差主要分为两部分，一部分是由透过率谱线宽度变化带来的误差，另一部分则是由透过率谱线中心波长漂移带来的误差。下面分别讨论这两种情况。

HITRAN 数据库仿真结果表明，CO_2 大气透过率各个峰值的半高宽基本一致[9]。半高宽

波数为 0.07 cm^{-1}，转化为波长半高宽：

$$\Delta\lambda_{nm}=\frac{10^7}{\frac{10^7}{\lambda}-\frac{\Delta\lambda_{cm^{-1}}}{2}}-\frac{10^7}{\frac{10^7}{\lambda}+\frac{\Delta\lambda_{cm^{-1}}}{2}} \tag{12}$$

在系统工作波段 1.57 μm 附近，CO_2 吸收光谱的半高宽约为 0.017 nm。

FP 腔透过率函数的半高宽(Full Width at Half Maximum，FWHM)为

$$FWHM=\frac{2(1-R)}{\sqrt{R}} \tag{13}$$

式中，R 为 FP 谐振腔镜面的反射率。FP 腔透过率半高宽和大气透过率半高宽应该基本一致，但由于光纤 FP 滤波器两个反射面的反射率 R 会受到光纤应力、温度等环境参数的影响，两个半高宽数值不再匹配，从而造成误差。

为了描述 FP 腔透过率半高宽变化对通道 1 的影响，设 $\Delta\lambda_0$ 为理想状态下 FP 腔的 $FWHM$，$\Delta\lambda_1$ 表示受外界环境影响之后的 FP 腔的 $FWHM$，在大气透过率半高宽不变的前提下，通道 1 接收到的光能量为 $\Delta\lambda_1 S_1/\Delta\lambda_0$，此时系统差分信号为

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_0}\frac{S_1}{S_2}=\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_0}\cdot\delta \tag{14}$$

由光纤 FP 腔透过率半高宽变化造成的相对误差为 $|1-\Delta\lambda_1/\Delta\lambda_0|$。

FP 腔的峰值波长为

$$\lambda_c=\frac{2nd\cos\theta}{k},\ k=1,2,3\cdots \tag{15}$$

入射角 $\theta=0$ 时，$\lambda_c=2nd/k$。由公式可知，峰值波长受腔内介质和长度的影响，而环境温度会影响介质的折射率，光纤受力会影响腔长，所以 λ_c 的变化对环境参数也是敏感的。由于光波长和光频率成反比，频率域上 FP 腔的透过率函数可以看作等间隔 Airy 函数叠加，对中心波长变化的误差讨论都以光频率为基准。

当峰值频率 ν_c 偏移数值恰好等于 FP 腔的自由光谱范围(Free Spectral Range，FSR)时，频率域上 FP 腔透过率函数的第 m 个峰值偏移到相邻的 m+1(或 m−1)峰值频率位置，系统的整体信号不受影响。由此可见，透过率中心频率偏移所带来的误差变化是周期性的，当中心频率偏移量 $\Delta\nu_c$ 在 FSR/2 范围内时，偏移量越大，误差就越大。在 FSR/2～FSR 范围内，偏移量越大，误差反而越小，这里仅考虑 FSR/2 范围内的误差。

FP 腔中心频率偏移造成两透过率重叠部分减少。设 FP 腔的透过率函数在中心波长变化时波形保持不变，则通道 1 上的能量约为

$$S_{1\nu}=\frac{\nu_{FWHM}-\Delta\nu_c}{\nu_{FWHM}}S_1 \tag{16}$$

差分信号为

$$\frac{S_{1\nu}}{S_{2\nu}}=\delta-\frac{\Delta\nu_c}{\nu_{FWHM}}\delta \tag{17}$$

由此可知，在 FP 腔中心波长发生小范围偏移时，系统差分信号将变小。FP 腔透过率中心波长偏移带来的相对误差为 $\Delta\nu_c/\nu_{FWHM}$。

综合考虑上述两个影响，由 FP 腔滤波器造成的误差可以表示为

$$\Delta\delta_3=\sqrt{(1-\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_0})^2+(\frac{\Delta\nu_c}{\nu_{FWHM}})^2} \tag{18}$$

为了降低 FP 腔工作时造成的误差，需要对光纤 FP 腔进行相应的控温和力学固定。

2.4　探测器误差

差分系统使用了两个相同的探测器。设探测器的噪声为 S_n，差分信号为 $[\delta_{\min},\delta_{\max}]$，则：

$$\delta_{min}=\frac{S_1-S_n}{S_2+S_n}=\delta-\frac{1+\delta}{SNR_2+1} \tag{19}$$

$$\delta_{max}=\frac{S_1+S_n}{S_2-S_n}=\delta+\frac{1+\delta}{SNR_2-1} \tag{20}$$

则相对误差为

$$\Delta\delta_4=\frac{1+1/\delta}{SNR_2-1} \tag{21}$$

由式(21)可知，探测器带来的误差不仅和探测器的信噪比有关，还和理想状态下差分信号的大小有关。探测器的信噪比越大，则系统获得的差分信号误差就越小。而系统设计中，理想状态下差分信号 δ 越小，探测器带来的系

统探测相对误差就越大。

通过上述讨论，硬件系统的误差计算结果为

$$\Delta\delta=\sqrt{\Delta\delta_1^2+\Delta\delta_2^2+\Delta\delta_3^2+\Delta\delta_4^2} \tag{22}$$

3 总结

对宽频光源-FP 腔滤波的 CO_2 检测系统的误差展开了讨论。常用的大气检测系统误差分析都是基于大气数据进行的，通过系统各项参数误差仿真对应的大气浓度误差。这种方式虽然可以直接反映系统各误差项对最终数据产品的影响，但很难对系统设计优化给出定量化的建议。另一方面，硬件设计装调只是大气 CO_2 浓度检测的第一步，后续的反演算法对于最终产品的误差还有很大影响，单纯将硬件系统误差直接关联到最终数据产品所获得的误差结果，跳过了反演算法，实际上是无法实现的。本文直接计算各误差项引起的差分数值误差，把硬件系统误差和反演算法误差剥离开，有助于提高系统的设计水平。

参考文献

[1] 贾朋群，郑秋红. 基林和基林曲线：人类定量认识自身与自然关系的先行者和风向标 [J]. **气象科技进展**，2015，**7**(3)：76-80.

[2] Kuze A，Suto H，Nakajima M，et al. Thermal and Near Infrared Sensor for Carbon Observation Fourier-transform Spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for Greenhouse Gases Monitoring [J]. *Applied Optics*，2009，**48**(35)：6716-6733.

[3] Frankenberg C，Pollock R，Lee R A M，et al. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2)：Spectrometer Performance Evaluation Using Pre-launch Direct Sun Measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*，2014，**7**(1)：7641-7670.

[4] 刘毅，蔡兆男，杨东旭，等. 中国二氧化碳科学实验卫星高光谱探测仪光谱指标影响分析及优化方案 [J]. **科学通报**，2013，**24**(27)：2787-2789.

[5] Dobbs M，Dobler J，Moore B，et al. Active Sensing of CO_2 Emissions over Nights，Days，and Seasons (ASCENDS) [C]. San Francisco：AGU Fall Meeting，2007.

[6] Heaps W S. Broadband Lidar Technique for Precision CO_2 Measurement [C]. *SPIE*，2008，**7111**：711102.

[7] 刘豪. 大气二氧化碳探测差分吸收激光雷达技术研究 [D]. 上海：中国科学院上海技术物理研究所，2015.

[8] 方祖捷. **光纤传感器基础** [M]. 北京：科学出版社，2014.

[9] Mao J，Kawa S R. Sensitivity Studies for Space-based Measurement of Atmospheric Total Column Carbon Dioxide by Reflected Sunlight [J]. *Applied* Optics，2004，**43**(4)：914-927.