文章编号　1004-924X(2017)08-2064-12

碳卫星高光谱 CO_2 探测仪发射前光谱定标

蔺　超[1]，李诚良[1]，王　龙[1]，毕研盟[2]，郑玉权[1*]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 国家卫星气象中心，北京 100081)

摘要：为了完成碳卫星高光谱 CO_2 探测仪的发射前光谱定标，建立了光谱定标系统，并对定标系统设计、所采用的自动化数据采集和数据处理算法等进行了研究。根据 CO_2 探测仪的探测原理介绍了载荷的光谱性能要求，描述了定标系统的设计与所采用的仪器设备，说明了采用自动化数据采集、旋转积分球、功率校正与暗背景校正等改进的定标方法。最后，介绍了光谱定标的数据处理方法。发射前定标结果表明：载荷三个波段的 ILS 能量集中度分别大于 0.80，0.81 和 0.78；FWHM 分别为 0.039 2～0.042 4 nm，0.123～0.128 nm 和 0.157～0.168 nm；光谱采样率区间分别为 2.12～2.95、1.97～2.27 和 1.92～2.26。对发射后实测太阳夫朗禾费光谱进行了评估，结果表明：中心波长偏差小于 0.0013，0.058和0.065 nm。CO_2 探测仪整体的光谱性能指标能够达到系统设计要求。

关　键　词：光学遥感；碳卫星；二氧化碳探测仪；光谱定标；线形函数
中图分类号：TP394.1；TH691.9　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20172508.2064

Preflight spectral calibration of hyperspectral carbon dioxide spectrometer of TanSat

LIN Chao[1], LI Cheng-liang[1], WANG Long[1],
BI Yan-meng[2], ZHENG Yu-quan[1*]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, ChangChun* 130033, *China*;
2. *National Satellite Meteorological Center, Beijing* 100081, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn*

Abstract: In order to realize spectral calibration for TanSat's hyperspectral Carbon Dioxide Spectrometer (CDS), a calibration system was established and relevant methodology such as design of the system, data acquisition and algorithms of data processing and etc was investigated. Based on the sounding principle, CDS's spectral requirements were presented. Design of calibration system and the adopted equipments was described. Then after the scheme of Orbiting Carbon Observatory's spectral calibration was compared, the modified methods such as automatic data acquisition, rotatable integrating sphere, power and dark calibration was analyzed. Finally, the methods of data processing were described as well. Experimental results indicate that the ILS concentration radios of CDS are more

收稿日期：2017-03-27；**修订日期**：2017-05-02.
基金项目：国家 863 高技术发展计划资助项目(No. 2011AA12A102)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

than 0.80, 0.81, 0.78 respectively and the intervals of FWHM are 0.039 2－0.042 4 nm, 0.123－0.128 nm, 0.157－0.168 nm respectively. The intervals of spectral sampling are 2.12－2.95, 1.97－2.27, 1.92－2.26 respectively. The comparison of on-orbit solar spectra indicate that the difference of central wavelength are less than 0.001 3, 0.058, 0.065 nm respectively. It can satisfy the system requirements of CDS.

Key words: remote sensing; TanSat; carbon dioxide spectrometer; spectral calibration; instrument line shape(ILS)

1　引　言

为了应对全球气候变化的巨大挑战，基于星载被动式高光谱遥感技术实现高精度、高空间分辨率的全球 CO_2 浓度定量探测，经过工程技术积累与科学验证，目前已进入快速发展阶段[1-7]。

最新一代专门用于 CO_2 遥感探测的卫星以日本 2009 年 1 月发射的 GOSAT 与美国 2014 年 1 月发射的 OCO-2 为代表[8-10]，均采用 1.61 μm 的 CO_2 弱吸收带作为主要的探测波段，增加对近地表 CO_2 浓度的探测敏感性，同时辅以 0.76 μm 的 O_2-A 带与 2.06 μm 的强 CO_2 吸收带对气溶胶、地表气压等反演要素同步测量，通过全物理反演算法最终生成柱浓度 CO_2 干空气混合比(column-averaged CO_2 dry air mole fraction, XCO_2)数据产品[11]。相比于 IASI、AIRS 等仪器所采用的 CO_2 热红外吸收波段，采用 1.61 μm 的 CO_2 弱吸收带可显著降低大气温度的影响[3-4]，但是由于其信号较弱，对载荷的光谱辐射性能提出了极高的要求。

我国于 2011 年启动了“全球二氧化碳监测科学试验卫星(简称碳卫星)与应用示范”项目，卫星主载荷为高光谱与高空间分辨率 CO_2 探测仪(简称 CO_2 探测仪)与云雨气溶胶成像仪(Cloud and Aerosol Polarization Imager, CAPI)。CO_2 探测仪与 CAPI 集成化设计，CAPI 采用更大的视场，并为 CO_2 探测仪提供云检测数据。该卫星于 2016 年 12 月 12 日在酒泉卫星发射中心成功发射，卫星入轨后通过各项功能测试，并于 2017 年 1 月 12 日开启 CO_2 探测仪，进入载荷在轨测试阶段。CO_2 探测仪采用光栅衍射分光技术方案[12]，最高可达 0.04 nm 的光谱分辨率给载荷发射前的光谱定标带来极大的挑战。本文主要描述了 CO_2 探测仪发射前进行光谱定标的方法、测试设备、数据处理及定标结果。

2　载荷概述

2.1　载荷光谱性能要求

CO_2 探测仪采用结构相似的 3 套光谱仪系统分别对 0.76 μm(O_2-A band)、1.61 μm(Weak CO_2 band)和 2.06 μm(Strong CO_2 band)3 个波段进行高光谱探测，表 1 列出了 CO_2 探测仪的光谱性能要求与部分系统指标。

极高的光谱分辨率提高了 CO_2 柱浓度反演的敏感性，CO_2 探测仪在近红外波段的光谱分辨率低于 OCO-2，在保证波段带宽的前提下，系统设计上采用大于 2 的光谱采样率(Spectral sampling/FWHM)保证了典型观测条件下的信噪比要求，减小光谱分辨率对反演精度的影响[13]。

CO_2 探测仪对空间维多个像元合并使用，采用约 3 Hz 的帧频，实现 2 km×2 km 的地面分辨率。为保证数据合并的有效性并控制色散焦面与探测器的空间配准，要求全视场空间像元的中心波长空间一致性(Centroid wavelength spatial consistency)优于 0.02 nm。

仪器线形函数(Instrument Line Shape, ILS)是最重要的载荷光谱特性参数，通过 ILS 集中度(ILS concentration radio)对载荷 ILS 的能量集中程度进行约束，CO_2 探测仪的 ILS 接近矩形函数，光谱维度上弥散很小，R0.5 代表了 ILS 在 ±0.5FWHM 波长范围内的能量积分对应 ±3FWHM 波长范围内总能量积分的占比。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 CO_2 探测仪的光谱性能要求

Tab. 1 Spectral requirements of carbon dioxide spectrometer's

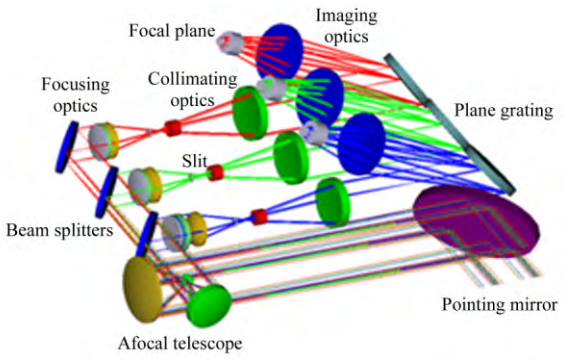
Band	Parameter	Requirements
O_2-A		758－778
Weak CO_2	Spectral ranges/nm	1 594－1 624
Strong CO_2		2 041－2 081
O_2 A-band		0.033－0.047
Weak CO_2	Spectral resolutions /nm	0.120－0.142
Strong CO_2		0.160－0.182
O_2 A	Signal to noise ratio	360
Weak CO_2	(～5% albedo@60°solar	250
Strong CO_2	zenith angel)	180
	Spectral sampling / FWHM	＞2
	ILS concentration radio /±3FWHM	$R_{0.5}$＞0.7
	Centroid wavelength spatial consistency(nm)	＜0.02
	IFOV/km^2	2×2
	Frame rate/Hz	～3

2.2 CO_2 探测仪原理与系统组成

CO_2 探测仪采用三通道光栅光谱仪方案，由一块 Si-CCD 探测器(O_2-A band)和两块 MCT 探测器(Weak CO_2 band & Strong CO_2 band)分别接收 3 个波段的气体吸收光谱。图 1(a)为 CO_2 探测仪的光学系统布局。携带大气吸收信息的太阳反射辐射经过指向反射镜进入无焦望远系统，望远系统由两个抛物面组成，以准直光出射，将出射光束孔径缩小为入射光束孔径的 2/3，然后经过分束片、滤光片、偏振片和汇聚镜头，将入射光聚焦到对应波段光谱仪的入射狭缝上。从狭缝出射的光经过准直镜准直入射到衍射光栅上，色散后由成像系统分别成像[12]。

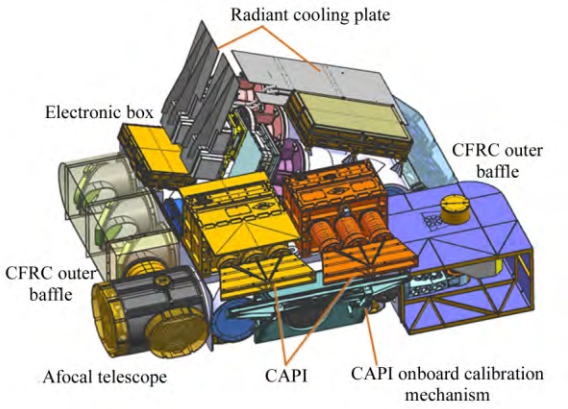
光谱仪部分采用相似的光机结构集成装配在主体框架上，用于保证光谱仪系统的整体刚度和热稳定性，配装在主框架上的功能组件还包括探测器与指向控制电箱、星上定标组件等，如图 1(b)所示。CAPI 集成在 CO_2 探测仪的主框架上，通过光轴配准覆盖 CO_2 探测仪视场。

指向反射镜由铝合金制造[14]，安装在一维转动支架上，采用一镜两用的新颖设计。一面镀镍抛光成镜面，接收地物反射辐射；另一面研磨至漫反射面，通过接收内定标灯和太阳的直射辐射在仪器入瞳前形成近朗伯特性的面辐射源，所获取的太阳夫琅禾费特征谱线经过多普勒频移校正后用于在轨光谱定标。



(a)光学系统

(a) Schematic layout of optical system



(b)光机结构组成

(b) Opto-mechanical structure

图 1 CO_2 探测仪的系统组成

Fig. 1 Composition of carbon dioxide spectrometer

光谱仪狭缝的有效长度为 7.2 mm，宽度分别为 27 μm(O_2-A band)和 37 μm(Weak CO_2 band & Strong CO_2 band)，采用弯曲狭缝设计以校正光栅色散产生的谱线弯曲。

为了抑制近红外波段的内部热辐射背景，整机闭环控制在－5 ℃的温度水平，近红外波段在探测器窗口前增加窄带滤光片，并通过辐射冷板＋热管的方式经由探测器壳体将窄带滤光片降温至－30 ℃。

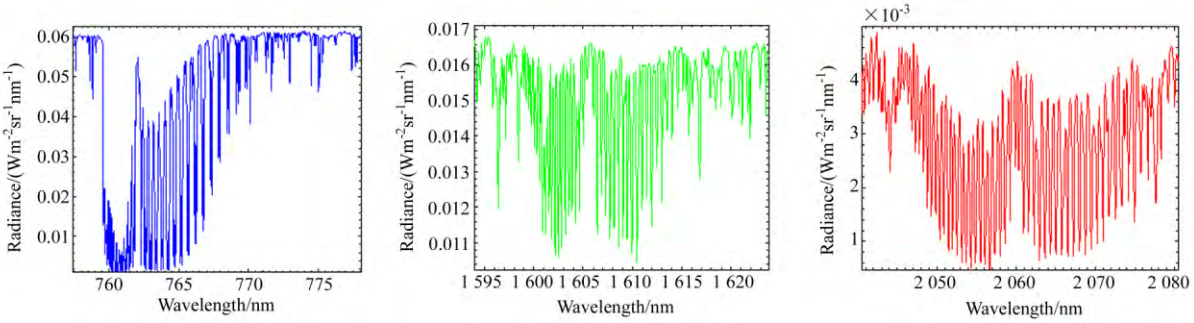
在光学系统相对孔径不变的情况下，增大探测器的面积可以有效提高系统的信噪比。CO_2 探测仪的探测器采用星上像元合并的方式，在空间方向合并多个像元作为一个空间探元。对于 O_2-A 波段探测器，像元尺寸为 22.5 μm，采用 16 元合并为 360 μm 的空间像元，光谱维方向不合并，合并后探元的尺寸为 360 μm×22.5 μm，采样

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

点数为 20×1 242 元（空间维×光谱维）。1.61 μm 和 2.06 μm 波段探测器的像元尺寸为 30 μm，采用 12 个像元合并为 360 μm 的空间探元，光谱维方向探测器像元不合并，一个光谱探元的尺寸为 360 μm×30 μm，采样点数为 20×500（空间维×光谱维）。

上述采样点数据下传后，经地面应用系统数值合并生成 9 元空间像元（footprint），3 个波段每个 footprint 对应 2 km 的地面分辨率，分别包含 1 242，500，500 个光谱通道，采用 14 bit 量化。此外，CO_2 探测仪在轨运行时还具备全帧（不合并）输出功能，该功能的目的是在轨识别探测器坏点和近红外 MCT 探测器暗场监测。

图 2 所示为 CO_2 探测仪于 2017 年 1 月 13 日利用星下点对地科学观测模式获取的第一组空间对地观测地球大气 O_2 和 CO_2 吸收光谱图[15]。时间是世界时 7 点 1 分 43 秒，地点在印度半岛东北部地区。



（a）O_2-A 波段
（a）O_2-A band

（b）弱 CO_2 吸收波段
（b）Weak CO_2 band

（c）强 CO_2 吸收带
（c）Strong CO_2 band

图 2　CO_2 探测仪首张大气吸收光谱图

Fig. 2　The first atmospheric absorption spectrum from carbon dioxide spectrometer

3　定标方法

可调谐激光器＋波长计的光谱定标方案是实现极高分辨率光谱定标的优选方案[16]。CO_2 探测仪采用与 OCO 相似的定标方案，改进的部分主要包括：采用自动化数据采集软件对 O_2-A 波段和弱 CO_2 吸收波段的全部光谱通道 ILS 进行数据采集，减少了 OCO 采用插值方法获得部分通道 ILS 的不确定性；采用旋转积分球消除激光散斑的影响，避免旋转毛玻璃器件带来的透过率损耗；采用图像能量积分值作为功率反馈，实现 ILS 数据点的光源功率校正；增加近红外波段的时间序列暗背景采集步骤，精确校正 MCT 探测器背景的热漂移。

3.1　定标系统设计

CO_2 探测仪的定标系统如图 3 所示。该系统采用可调谐激光器作为定标光源，在保证极窄激光带宽输出的同时满足较高的定标能量要求。对 O_2-A 波段和弱 CO_2 吸收波段，激光输出通过耦合器进入以熔石英作为芯径材料的分束光纤入射端，分束光纤出射端分别接入积分球和 NIR 波长计，波长计以 1 s 的采样频率提供激光输出的波长计量值和功率值，积分球放置在平行光管焦面处，输出均匀的准直定标光束，分束光纤在积分球接入端和波长计接入段的能量分束比均为 9∶1。

针对强 CO_2 吸收波段，激光器采用自由空间输出的单色光通过刀口分割器分束，分别接入积分球和 IR 波长计，可精密调整位移的刀口分割器增加了全波段内的积分球与能量分配调整裕量。CO_2 探测仪狭缝被单色激光照明后，经准直镜头和光栅色散后，由成像镜头汇聚在探测器焦面上，控制可调谐激光器以一定波长间隔扫描输出，对于每个 footprint 的各光谱通道，其不同单色响应下的量化 DN 值即为该通道的 ILS 基础数据，经过合并平滑、功率校正和归一化格点插值等处理后获取标准 ILS 数据点。单通道 ILS 数据测试完成后，经后处理可计算光谱分辨率、中心波长等定标参数，待全部通道 ILS 测试完成后，可进一步统计计算色散系数、光谱采样率和光谱范围等指标参数。

CO_2 探测仪覆盖热包覆层并隔热安装在真

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

空罐内(见图 3),真空罐配备 Ø300 mm 溶石英密闭窗口,真空度优于 10^{-2} Pa,采用并联压缩制冷机组将热沉温度闭环设定为 −40 ℃。真空罐外独立设置一台压缩制冷机,将罐内额外一块热沉冷板降温至 −60 ℃,通过导热索将 −60 ℃冷板与 MCT 探测器壳体导热连接,用于替代在轨所采用的辐射冷板(见图 1)。热控仪通过穿仓电缆连接至 CO_2 探测仪 32 路加热片与控温及测温传感器,将光机主体主动热控至 −5 ℃,MCT 探测器壳体部分的温度水平控制在 −30 ℃。其他仓外设备还包括:快视与存储、电流监测、星务指令和电源等。

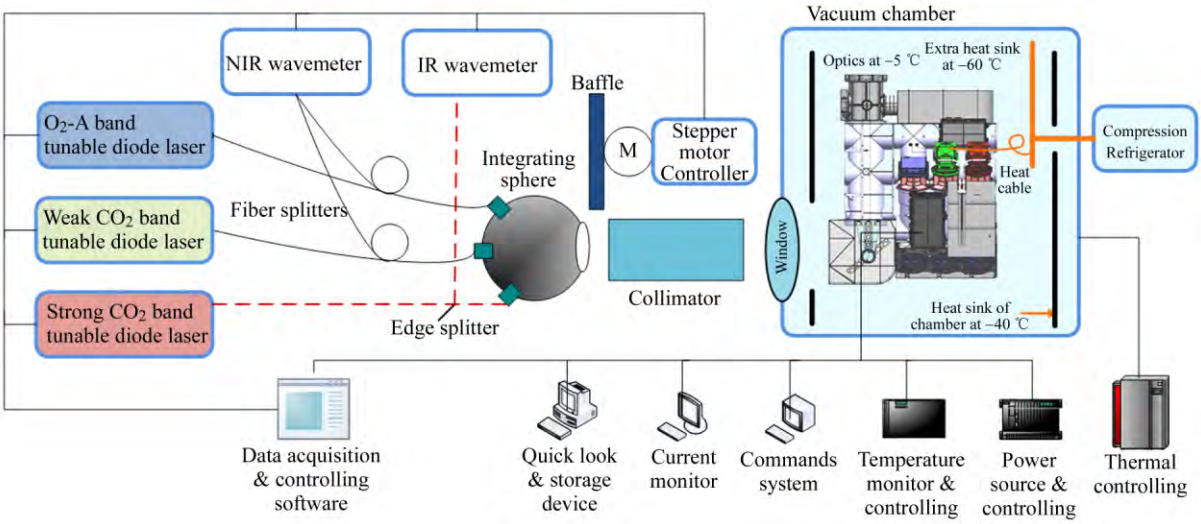


图 3 CO_2 探测仪光谱定标系统

Fig. 3 Spectral calibration system of Carbon Dioxide Spectrometer (CDS)

光谱定标系统需要对 CO_2 探测仪 3 波段各 9 个 footprint 的全部通道进行 ILS 测试,共计 20 178个光谱通道,波长扫描的采样间隔设为 0.1FWHM,将获得 6 万余组定标点集(在一次波长扫描中可以获取全部 9 个 footprint 定标数据)。每组定标点集的获取需要先对激光器输出波长和功率进行稳定性判定后,采集一段时间的图像数据进行帧平均以提高数据信噪比,人工操作将带来不可接受的数据采集时间。OCO 仅对部分光谱通道进行了 ILS 波长扫描的数据采集,在假定各通道的 ILS 于全波段范围上连续变化的前提下,对采集到的 ILS 选取 5 点以多项式拟合的方式内插出其余通道的 ILS[16]。CO_2 探测仪的光谱定标采用自动化数据采集软件,针对 O_2-A 波段和弱 CO_2 吸收波段的全部光谱通道,强 CO_2 吸收波段的前 34 nm 光谱通道(受限于激光器输出光谱范围),能够实现高效、准确的标定数据自动采集与存储,并将光谱定标数据采集周期缩短至 15 天。

3.2 关键仪器与设备

光谱定标系统所采用的关键设备包括可调谐激光器、波长计、真空罐和旋转积分球。

针对 3 个不同波段,采用美国 NEW FOCUS 公司的 3 种型号可调谐激光光源,具体参数见表 2。在光谱定标过程中,统计数据存储时长 15 s 内的可调谐激光器输出波长稳定性(RMS)分别为 0.2 pm(O_2-A band)、0.6 pm(Weak CO_2 band)和 0.4 pm(Strong CO_2 band)。

表 2 可调谐激光器参数

Tab. 2 Parameters of tunable diode lasers

Type	TLB6172	TLB6730	TLB6736
Band	O_2-A	Weak CO_2	Strong CO_2
Wavelength range /nm	758−778	1550−1630	1975−2075
Minimum power /mW	5	4	2
Line widths/kHz	<300	<300	<300
Stability(pm/15 s)	0.2	0.6	0.4

波长计内置激光参考源,提供标定波长标准。采用美国 Bristol Instrument 公司的两种波长计产品,波长准确度高于 ±0.3 pm。产品参数见表 3。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　波长计参数

Tab. 3　Parameters of wavemeters

Type	621B-NIR	621B-IR
Range of wavelength/nm	600－1 800	1 500－4 000
Accuracy of wavelength /10^{-6}	±0.2	±1
Sampling rate/Hz	1	1
Input power/μW	≥20	≥1

真空罐直径为 2 m，热沉温度调节范围为－45～80 ℃，传感器的温度偏差优于 0.3 ℃，温度均匀度优于 0.5 ℃，温度波动优于±0.3 ℃。

由于具有高度相干性，激光入射到积分球后在出光口会形成空间强度随机分布的激光散斑，激光散斑导致积分球出光口的出射度不均匀。在积分球开口设置旋转毛玻璃可将激光散斑的影响限制在可接受的水平，但同时带来约 30%的透过率损耗，特别是降低了强 CO_2 吸收带的数据获取质量。

本文设计了一种旋转积分球，使积分球两个半球部分以一定频率相对往复转动，进而匀化出光口的激光散斑，其实验与旋转毛玻璃相当。旋转积分球的结构如图 4 所示。积分球直径为 5.08 cm，内壁压制成聚四氟乙烯膜层。

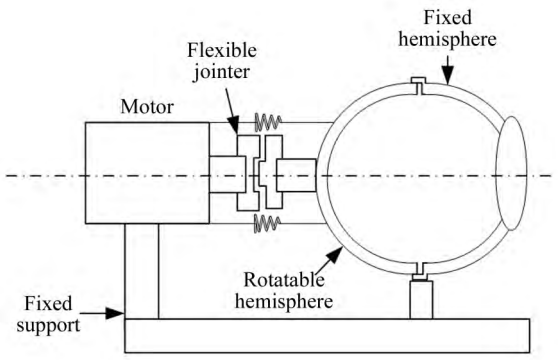


图 4　旋转积分球结构示意图

Fig. 4　Structure of rotatable integrating sphere

3.3　数据采集控制

自动化数据采集软件采用 Labview 编写，调用定标设备 API 通过 USB、TCP\IP、RS232 协议分别实现与可调谐激光器、波长计、快视与存储设备和步进电机控制器的通讯控制（如图 3 所示），根据设定波长可通过波长计数据反馈采用粗调和 PZT 精调的方法精确控制波长输出，在波长和功率稳定性预判后，同步快视与存储设备进行数据存储，对存储时长内激光功率和波长稳定性进行统计，确认数据有效性后开始下一个波长扫描过程。为了校正探测器长期开机产生的暗场漂移，增加暗背景采集步骤，在间隔若干波长扫描后控制挡板遮挡积分球出光口，对全部定标过程中的暗背景时间序列进行采集。数据采集控制参数见表 4。

表 4　数据采集控制参数

Tab. 4　Summary of data acquisition parameters

Band	O_2-A	Weak CO_2	Strong CO_2
Scanning range/nm	758－778	1593－1625	2040－2075
Sampling interval/nm	0.005	0.015	0.02
Sampling interval of dark/nm	0.25	0.15	0.2

3.4　数据处理方法

3.4.1　ILS 数据处理方法

ILS 的数据处理流程如图 5 所示。暗背景校正是对暗背景时间序列进行二次多项式拟合，获取暗背景随时间的缓变漂移规律，根据每帧图像数据的积分时间，对波长扫描过程中的暗背景进行插值，以校正数据采集过程中的暗背景漂移影响。暗背景校正后图像 DN 值数据是 CO_2 探测仪透过率、量子效率、电子学放大率和狭缝函数等参数对波长扫描过程中入射光通量的综合反映，经过通道间辐射校正获取相对光谱响应数据，对每帧图像数据的相对光谱响应值进行求和，以表征入射光通量。将帧平均后获得相对光谱响应数据去除入射光通量，获得初始 ILS 数据，以 O_2-A 带为例，如图 6(a)所示。

通过高斯拟合获取初始 ILS 的中心波长（见图 6(b)）。为了精确描述 ILS 的细节特征，需要进一步增加 ILS 的采样点数，在相邻部分通道的 ILS 可以在同一个 ILS 表征的假设下进行测试试验，最终确定采用 9 通道（O_2-A band）和 7 通道（Weak CO_2 band & Strong CO_2 band）的初始 ILS 进行数据合并以表征中间通道的 ILS。

根据高斯拟合结果，数据合并将中心波长设置为波长 0 点，以△λ 表示各采样点相对中心波长的差值。经过数据合并，ILS 初始数据集在一个半宽度的范围内将增加至 60 个采样点，如图 6(c)所示。针对合并后的 ILS 初始数据集，采用

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

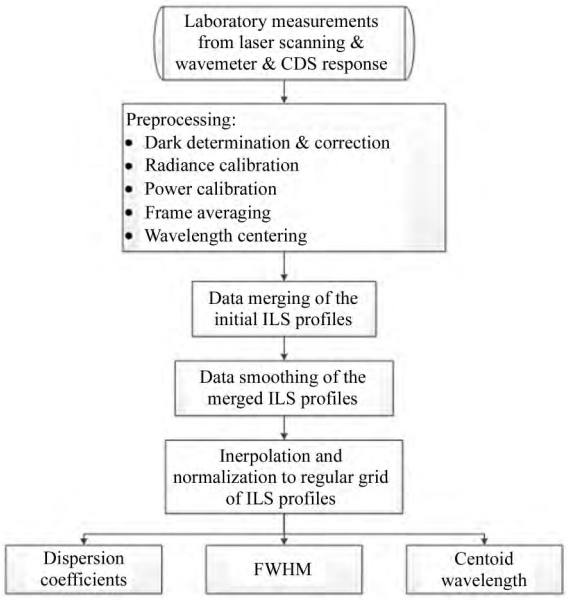
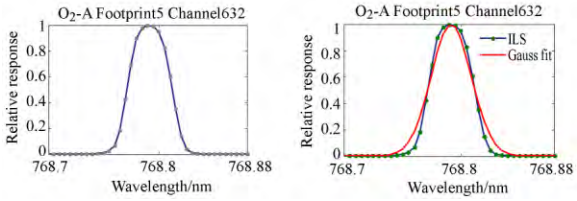


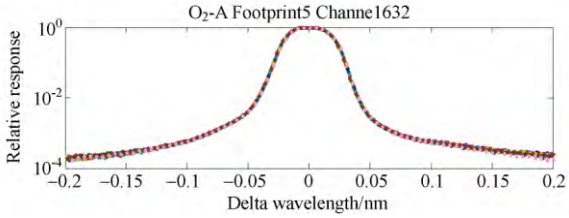
图 5 ILS 数据处理流程图

Fig. 5 Scheme of ILS data processing



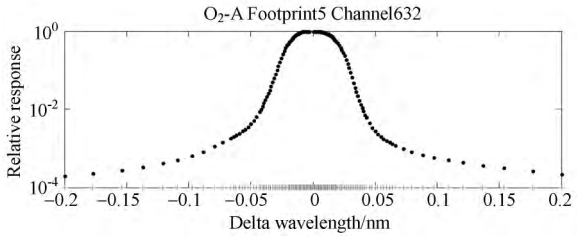
(a)初始 ILS 数据 (b)高斯拟合

(a) Initial ILS profiles (b) Gauss fitting of (a)



(c)合并后的初始 ILS 数据集

(c) Set of merged ILS profiles



(d)经平滑插值后的归一化 ILS

(d) ILS profiles by interpolated and normalized to regular grid

图 6 ILS 数据处理示意图

Fig. 6 Process chart of ILS profiles

200 个不等距采样点进行重插值，每个重插值数据以相邻 30 个初始数据点集进行 3 次多项式拟合后插值获得，归一化后获得单通道 ILS 数据点集，单通道的 ILS 波长截至范围为±5FWHM，如图 6(d)所示。

3.4.2 色散系数、光谱采样率、ILS 能量集中度的计算

色散系数是所有通道中心波长测定完成后，获取的仪器光谱色散曲线的 5 次多项式拟合方程，即：

$$f(\lambda) = \sum_{i=0}^{5} c_i \cdot channel^i, \tag{1}$$

其中：c_i 为色散曲线多项式拟合系数，为探测器通道数。单通道的光谱采样率即半峰宽除以该像元处的光谱采样间隔计算获得。光谱采样间隔以色散系数的一阶导数在该通道的取值计算，即：

$$SIF_{i,j} = \frac{FWHM_{i,j}}{f'(\lambda)_{i,j}}. \tag{2}$$

单通道 ILS 能量集中度以通道中心波长为基准。±0.5FWHM 波长范围内的 ILS 能量集中度计算公式为：

$$R_{0.5} = \frac{\int_{-0.5\mathrm{FWHM}}^{+0.5\mathrm{FWHM}} ILS(\lambda)}{\int_{-3\mathrm{FWHM}}^{+3\mathrm{FWHM}} ILS(\lambda)}. \tag{3}$$

4 发射前定标结果

CO_2 探测仪三波段 ILS 能量集中度与部分通道 ILS 数据如图 7 所示，O_2-A 波段、弱 CO_2 吸收波段、强 CO_2 吸收波段的 ILS 能量集中度分别大于 0.80，0.81 和 0.78，满足系统设计要求，体现了极高的光谱分辨特性。

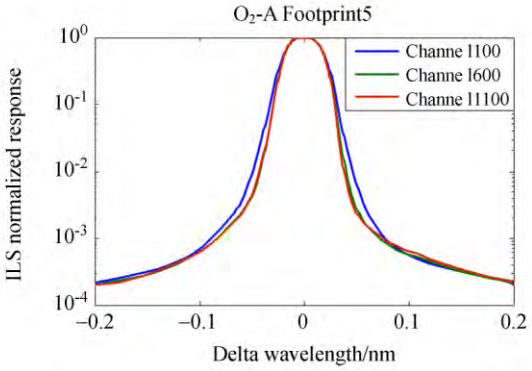
O_2-A 波段、弱 CO_2 吸收波段、强 CO_2 吸收波段的 FWHM 区间分别为 0.0392～0.0424 nm、0.123～0.128 nm 和 0.157～0.168 nm，如图 8 所示。在保证信噪比的同时降低 FWHM，增加了浓度反演的敏感性。

色散曲线及拟合残差如图 9 所示，三波段色散拟合的残差峰值分别小于 0.9，1.1 和 2.5 pm。光谱范围分别为 757.382～778.093 nm、1 593.973～1 623.842 nm 和 2 040.540～2 080.498 nm。

以相同通道各 footprint 中心波长的最大差值评价光谱空间一致性，如图 10 所示。三波段光

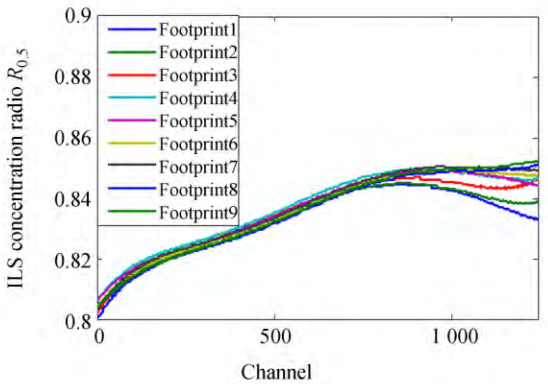
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

谱空间一致性分别小于 0.017，0.016 和 0.021 nm，基本满足系统设计要求。光谱采样率如图 11 所示，3 个波段光谱采样率分别在 2.12～2.95，1.97～2.27，1.92～2.26 之间，通过调整光谱仪的狭缝宽度，在满足光谱采样率的要求下提高了近红外波段的光谱分辨率。



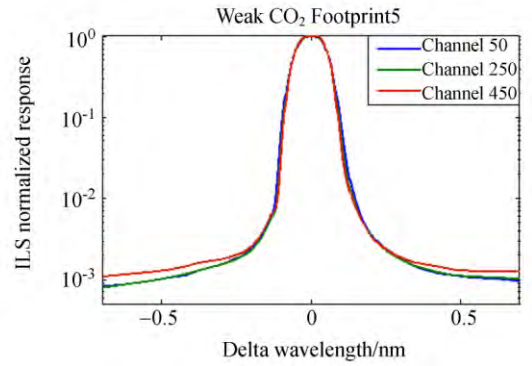
(a) O_2-A 带 footprint5 部分 ILS 线形数据

(a) Partial ILS profiles of O_2-A band (footprint5)



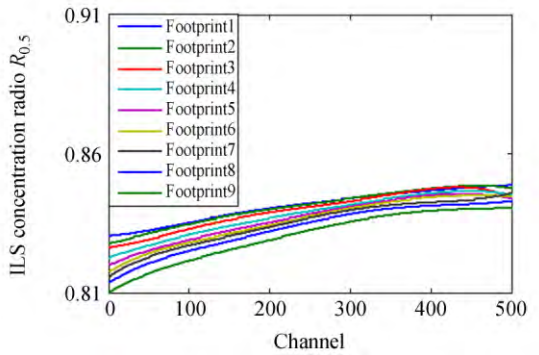
(b) O_2-A 带 ILS 能量集中度

(b) ILS concentration radio of O_2-A band



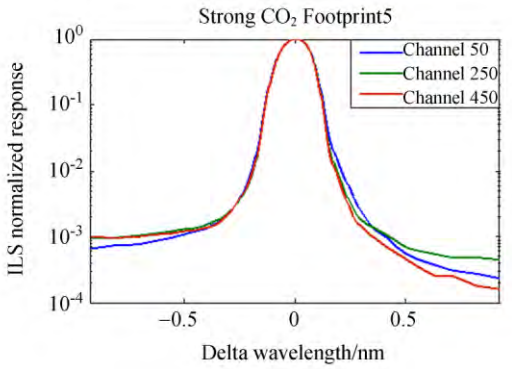
(c) 弱 CO_2 吸收带 footprint5 部分 ILS 线形数据

(c) Partial ILS profiles of weak CO_2 band (footprint5)



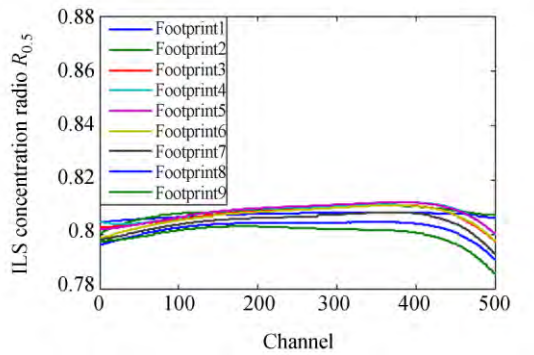
(d) 弱 CO_2 吸收带 ILS 能量集中度

(d) ILS concentration radio of weak CO_2 band



(e) 强 CO_2 吸收带 footprint5 部分 ILS 线形数据

(e) Partial ILS profiles of strong CO_2 band (footprint5)



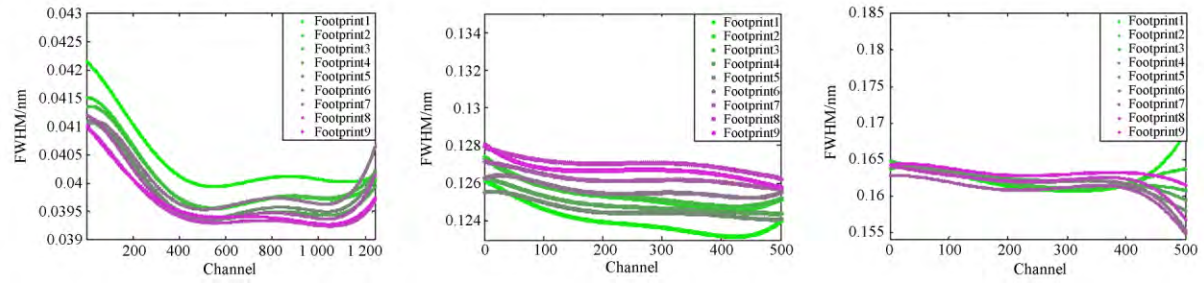
(f) 强 CO_2 吸收带 ILS 能量集中度

(f) ILS concentration radio of strong CO_2 band

图 7　CO_2 探测仪 ILS 及其能量集中度

Fig. 7　ILS and its concentration radio of carbon dioxide spectrometer

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

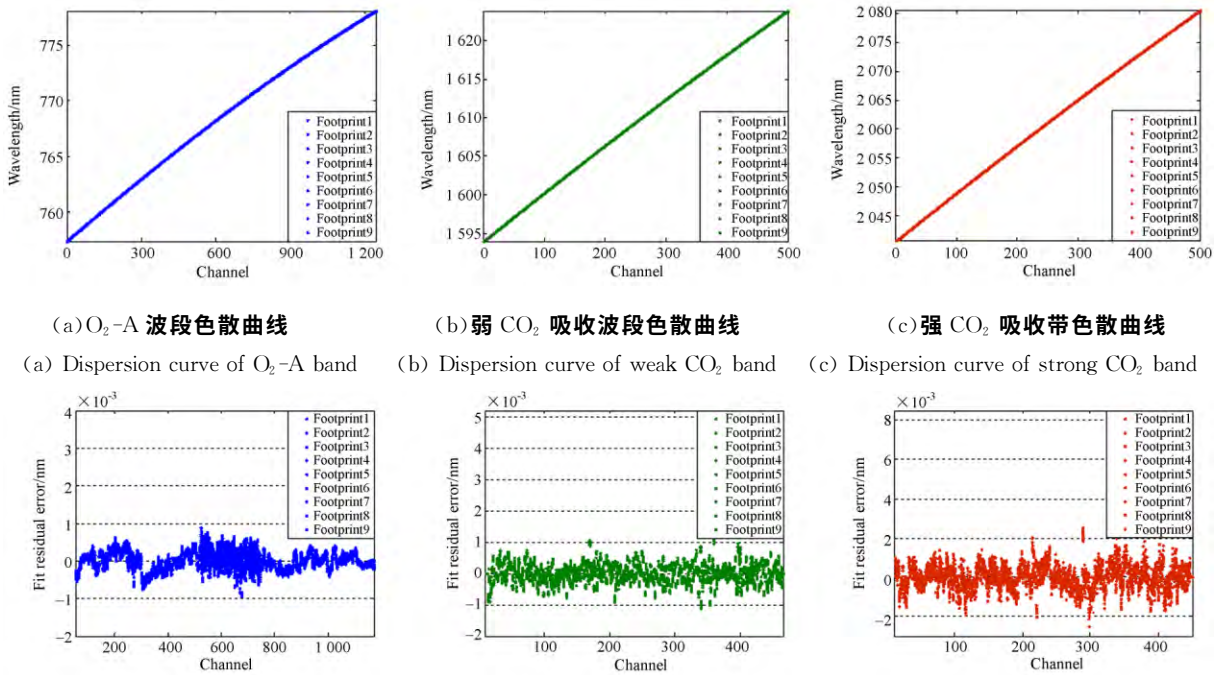


(a)O_2-A 波段　(b)弱 CO_2 吸收波段　(c)强 CO_2 吸收带

(a) O_2-A band　(b) Weak CO_2 band　(c) Strong CO_2 band

图 8　CO_2 探测仪的半峰宽度

Fig. 8　FWHM of carbon dioxide spectrometer



(a)O_2-A 波段色散曲线　(b)弱 CO_2 吸收波段色散曲线　(c)强 CO_2 吸收带色散曲线

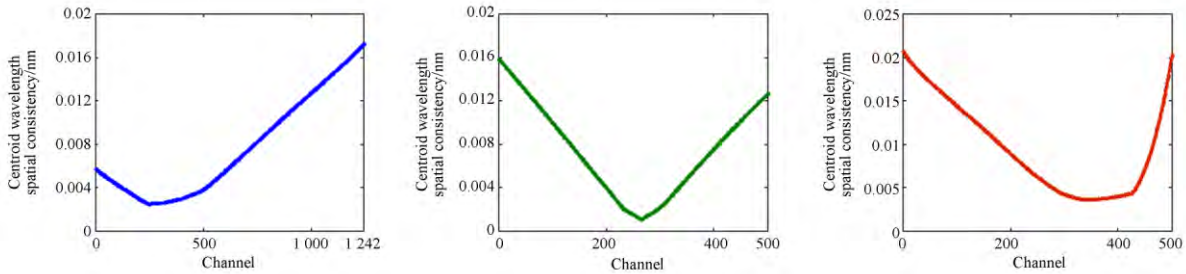
(a) Dispersion curve of O_2-A band　(b) Dispersion curve of weak CO_2 band　(c) Dispersion curve of strong CO_2 band

(d)O_2-A 波段色散拟合残差　(e)弱 CO_2 吸收波段色散拟合残差　(f)强 CO_2 吸收带色散拟合残差

(d) Fitted residuals of O_2-A band　(e) Fitted residuals of weak CO_2 band　(f) Fitted residuals of strong CO_2 band

图 9　CO_2 探测仪的色散曲线及拟合残差

Fig. 9　Dispersion curve and fitted residuals of carbon dioxide spectrometer



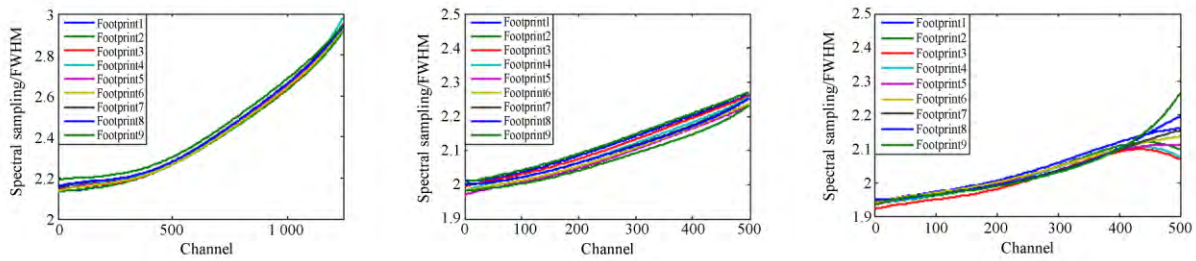
(a)O_2-A 波段光谱空间一致性　(b)弱 CO_2 吸收波段光谱空间一致性　(c)强 CO_2 吸收带光谱空间一致性

(a) Fitted residuals of O_2-A band　(b) Fitted residuals of Weak CO_2 band　(c) Fitted residuals of Strong CO_2 band

图 10　CO_2 探测仪的光谱空间一致性

Fig. 10　Centroid wavelength spatial consistency of carbon dioxide spectrometer

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) O_2-A 波段光谱采样率　(b) 弱 CO_2 吸收波段光谱采样率　(c) 强 CO_2 吸收带光谱采样率

(a) Spectral sampling of O_2-A band　(b) Spectral sampling of weak CO_2 band　(c) Spectral sampling of strong CO_2 band

图 11　CO_2 探测仪的光谱采样率

Fig. 11　Spectral sampling radio of carbon dioxide spectrometer

5　发射后太阳夫郎禾费谱线评估结果

对载荷发射后实测的太阳直射夫朗禾费谱线数据进行了评估，图 12～图 14 分别为三个波段经过多普勒频移修正后的太阳实测谱线与标准谱线的对比，标准谱线采用 Kurucz R. L 发布的高分辨率地外太阳标准照度数据。

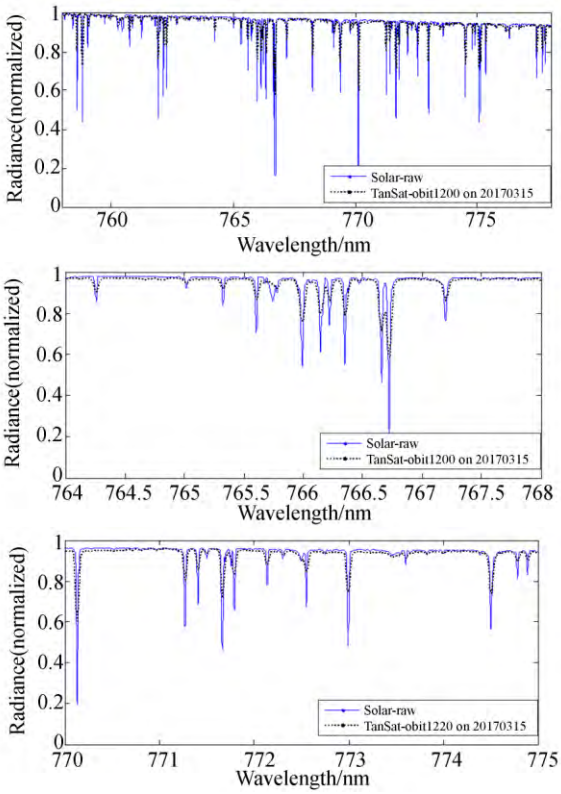


图 12　O_2-A 波段太阳实测光谱与标准光谱

Fig. 12　Comparison between measured and standard O_2-A band solar spectra

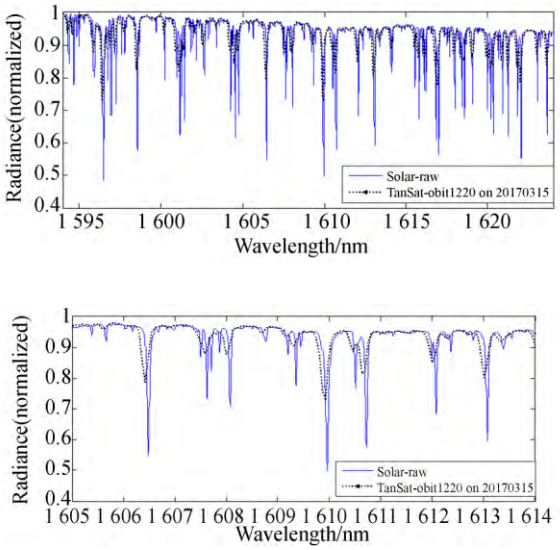


图 13　弱 CO_2 吸收波段太阳实测光谱与标准光谱

Fig. 13　Comparison between measured and standard weak CO_2 band solar spectra

采用多条吸收线进行对比，结果表明，O_2-A 波段、弱 CO_2 吸收波段、强 CO_2 吸收波段的吸收线峰值偏差小于 0.001 8，0.059 1 和 0.065 0 nm，3 个波段 9 个 footprint 的平均波长偏差分别为 0.001 3，0.057 9 和 0.064 5 nm，标准差为 0.32，0.93 和 3.82 pm。

采用多轨太阳定标数据进行评估，弱 CO_2 吸收波段和强 CO_2 吸收波段存在约 0.05 nm 和 0.06 nm的常值系统偏差，考虑该系统偏差可能来源于标准谱线与波长计标准的差异，还需结合地面高分辨率傅里叶光谱仪的同步观测数据进行进一步校准。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

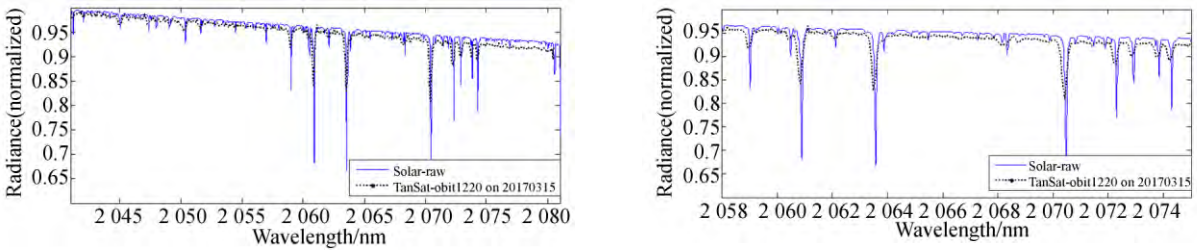


图 14 强 CO_2 吸收波段太阳实测光谱与标准光谱

Fig. 14 Comparison between measured and standard strong CO_2 band solar spectra

6 结 论

本文介绍了碳卫星载荷 CO_2 探测仪的原理与系统组成，根据载荷的光谱性能要求，采用可调谐激光器+波长计的定标方法，并描述了定标系统的设计、系统组成和定标原理。然后，研究了自动化定标数据采集流程与定标数据处理算法。最后，给出了载荷发射前光谱定标的实验结果。实验结果表明：载荷 O_2-A 波段、弱 CO_2 吸收波段和强 CO_2 吸收波段的 ILS 能量集中度分别大于0.80，0.81 和 0.78；FWHM 分别为 0.039 2～0.042 4 nm、0.123～0.128 nm 和 0.157～0.168 nm；光谱采样率分别在 2.12～2.95、1.97～2.27、1.92～2.26 之间，载荷整体光谱性能指标能够达到系统设计要求。

参考文献：

[1] BUCHWITZ M, REUTER M, SCHNEISING O, et al.. The Greenhouse Gas Climate Change Initiative (GHG-CCI): Comparison and quality assessment of near-surface-sensitive satellite derived CO_2 and CH_4 global data sets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162:344:362.

[2] MAGER R, FRICKE W, SCIAMACHY B J P. A new-generation of hyper spectral remote sensing instrument[J]. *SPIE*, 1997, 3106:84:94.

[3] AUMANN H H, PAANO T S. The atmospheric infrared sounder (AIRS) on the earth observing system[J]. *SPIE*, 2001, 4151:115:125.

[4] BLUMSTEIN D, CHALON G, CARLIER T, *et al.*. IASI instrument: technical overview and measured performances[J]. *SPIE*, 2004, 5543: 196-207.

[5] CRISP D, ATLAS R, BREON F M, *et al.*. The orbiting carbon observatory (OCO) mission[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34:700-709.

[6] GLUMB R, DAVI S G, LIETZKE C. The TANSO-FTS-2 instrument for the GOSAT-2 greenhouse gas monitoring mission[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Quebec City, Canada*, 13-18 *July*, 2014.

[7] ELDERING A, KAKI S, CRISP D, *et al.*. The OCO-3 Mission [J]. *AGUFM*, 2013, A21G: 0134E.

[8] BUTZ A, GUERLET S, HASEKAMP O, *et al.*. Toward accurate CO_2 and CH_4 observations from GOSAT[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(14):1-6.

[9] FRANKENBERC C, POLLOCK R, LEE R A M, *et al.*. The Orbiting Carbon Observatory(OCO-2): Spectrometer performance evaluation using prelaunch direct sun meansurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2014, 7(7): 7641:7670.

[10] ELDERING A, BOLAND S, SOLISH B, *et al.*. High precision atmospheric CO_2 measurements from space: the design and implementation of OCO-2[C]. *Aerospace Conference, IEEE, Big Sky, MT, USA*, 3-10 March 2012.

[11] DONGXU YANG, YI LIU, ZHAONAN CAI, *et al.*. An advanced carbon dioxide retrieval algorithm for satellite measurements and its application to GOSAT observations[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(23):2063:2066.

[12] 郑玉权. CO_2 探测仪光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(12):2645-2653.
ZHENG Y Q. Optical system design of a CO_2 sounder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2645-2653. (in chinese)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[13] YI LIU, ZHAONAN CAI, DONGXU YANG, *et al*.. Effects of spectral sampling rate and range of CO_2 absorption bands on XCO_2 retrieval from TanSat hyperspectral spectrometer[J]. *Science Bulletin*, 2014, 59(14):1485-1491.

[14] **汪逸群，王龙，郭万存，等. 空间多用途双面反射镜的设计与制备**[J]. **光学学报**, 2015, 4(35): 0428001-0428009.
WANG YIQUN, WANG LONG, GUO WANCHUN, *et al*.. Design and manufacture of space all-purpose double-faced reflective mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 4(35): 0428001-0428009. (in chinese)

[15] **任霄鹏. 碳卫星成功获取首组观测数据**[EB/OL]. (2017-01-22)[2017-03-22]. http://www.cas.cn/yw/201701/t20170122_4589141.shtml.
REN XIAOPENG. TanSat successfully obtained the first sets of sounding data. [EB/OL]. (2017-01-22) [2017-03-22]. http://www.cas.cn/yw/201701/t20170122_4589141.shtml. (in Chinese)

[16] JASON O. DAY, CHRISTOPHER W. O'DELL, RANDY POLLOCK, *et al*.. Preflight Spectral Calibration of the Orbiting Carbon Observatory [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 2011, 49(6): 2438-2447.

作者简介：

蔺　超(1984—)，**男，内蒙古呼伦贝尔人，硕士，助理研究员**，2007 **年**、2009 **年于吉林大学分别获得学士、硕士学位，现任中国碳卫星** CO_2 **探测仪副主任设计师，主要从事光谱仪器设计及定标方面的研究**。E-mail：linchao@ciomp.ac.cn

郑玉权(1972—)，**男，内蒙古通辽人，博士，研究员**，1999 **年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，现任中国碳卫星副总师，主要从事** CO_2 **探测仪的研究工作**。Email：zhengyq@sklao.ac.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net