

文章编号 1004-924X(2015)增-0229-10

基于遥感监测的高光谱分辨率与 高信噪比光谱探测技术

张 航^{1,2}, 郑玉权², 王文全^{1*}, 蔺 超², 刘栋斌²

- (1. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130000;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了精确利用卫星遥感监测获取的 CO₂ 等温室气体的信息实现对 CO₂ 浓度的反演,研究了高光谱分辨率与高信噪比光谱探测技术。采用大耀斑角反射式平面衍射光栅作为分光元件设计了光学系统,对 0.76, 1.61, 2.06 μm 3 个波段实现了精细光谱分光。根据光学遥感探测理论,推导 3 个波段的理论信噪比,揭示了光谱分辨率与信噪比之间的制约关系。选择大像元尺寸、高量子效率的探测器,通过像元合并以及盲元校正等方法,对小信号进行高信噪比探测。建立了一套精细光谱定标装置,分别测量 3 个波段内各个光谱通道的线性函数,并进行高斯拟合,从而准确标定各通道的中心波长和半宽度。实验验证显示光谱分辨率可达 0.04 nm,满足高光谱分辨率的光谱探测需求,为 CO₂ 浓度的精确反演奠定了技术基础。

关键词:光谱分辨率;信噪比;光谱定标;卫星遥感

中图分类号:TP731;O433.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0229

Spectral detection with high spectral resolution and high signal-to-noise ratio based on remote sensing monitoring

ZHANG Hang^{1,2}, ZHENG Yu-quan², WANG Wen-quan^{1*}, LIN Chao², LIU Dong-bin²

(1. College of Physics, Jilin University, Changchun 130000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wangwq@jlu.edu.cn

Abstract: To invert precisely the CO₂ concentration in atmosphere by the green-house gas information obtained by satellite remote sensing, this paper researches the high spectral detection technology with high spectral resolution and high Signal-to-Noise Ratio(SNR). A method of fine spectrum splitting was demonstrated using a large area diffractive grating at three spectral bands of 0.76, 1.61, 2.06 μm. According to the theory of remote sensing detection, the theoretical SNRs of the three bands were deduced to reveal the restrict relation between the spectral resolution and the SNR. The detectors with large pixel sizes and high quantum efficiency were selected to detect the weak signal with high SNR by

收稿日期:2015-05-17;修订日期:2015-06-13.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA12A103)

using methods of pixel combination and blind pixel correction. A spectral calibration facility was established to measure the instrument line shapes (ILSs) of the three bands, and the center wavelength and the full-width at half maximum (FWHM) of each spectral channel were determined with a Gaussian fit to the core of each ILS. The results of the spectral calibration indicate that the spectral resolution is 0.04 nm. The above-mentioned study provides the basis for the realization of accurate detection of absorption spectra and $1-4 \times 10^{-6}$ reversion precision of CO_2 .

Key words: spectral resolution; signal-to-noise ratio; spectral calibration; satellite remote sensing

1 引言

近年来,由 CO_2 等温室气体排放导致的全球变暖问题越来越严重,该问题也越来越受到世界各国的关注^[1-2]。2009 年,哥本哈根世界气候大会提出了“可测量”、“可报告”、“可核查”的要求^[3]。中国需要发展自己的温室气体遥感监测系统来获取第一手的全球气体分布数据和排放数据,以向世界证明自己减排的执行情况。

美国、日本和欧洲等航天发达国家均开展了 CO_2 监测卫星的研发工作。2009 年 1 月,日本发射了监测全球大气中 CO_2 和 CH_4 含量的卫星 GOSAT (Greenhouse gases Observing Satellite),其上搭载了超高光谱傅里叶变换光谱仪 (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer, TANSO-FTS),覆盖了 $0.75 \sim 14.3 \mu\text{m}$ 的大气光谱,光谱分辨率为 $0.02 \sim 0.04 \text{ nm}$,信噪比为 120 左右^[4]。2014 年 7 月,美国航天局发射的天基大气 CO_2 观测专用卫星 OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2),光谱分辨率为 $0.04 \sim 0.1 \text{ nm}$,信噪比为 240^[5-6]。

依托国家高技术研究发展计划地球观测与导航技术领域的“全球二氧化碳监测科学实验卫星与示范”重大项目,我国正在研制高空间分辨率和高光谱分辨率的全球 CO_2 监测科学试验卫星(简称:碳卫星),主要载荷为高光谱与高空间分辨率的 CO_2 探测器(简称: CO_2 探测器)和多波段云与气溶胶探测器。大气 CO_2 遥感探测基于气体吸收光谱探测,本课题组选择 $1.61, 2.06 \mu\text{m}$ 的 CO_2 吸收线以及 $0.76 \mu\text{m}$ 的 O_2 吸收线进行超光

谱探测,用于 CO_2 的反演。 $1.61 \mu\text{m}$ 波长的 CO_2 吸收比较弱,但对接近地球表面的 CO_2 的浓度最敏感,可以反映低层空间的 CO_2 分布状况; $2.06 \mu\text{m}$ 吸收 CO_2 极强烈,并可以完全独立地测量大气中的 CO_2 含量,这个波段所有的光在穿过整个大气时都会被吸收,增加 CO_2 并不会增加吸收量,所以这个波段对显示 CO_2 总量变化的作用不大。但是这个波段可以提供有关太阳光的光路信息,可以探测云,大气中的悬浮微粒和大气压力变化等。 $0.76 \mu\text{m}$ 用来测量光路中氧分子的含量,判断光在穿越大气时经过了多长距离,从而为 CO_2 浓度的反演提供一个参考量。

借鉴国际温室气体遥感探测的成功经验^[7-9], CO_2 探测器采用光栅分光方法,采用大耀斑角反射式平面衍射光栅对 3 个谱段进行分光,满足光谱分辨率的要求。根据光学成像遥感理论,为了提高 CO_2 的反演精度,需要同时满足高光谱分辨率和高信噪比的光谱探测能力,但是这两个指标却是相互制约的,高光谱分辨率意味着每个光谱通道接收到的信号能量很弱,而信噪比与信号强度成正比。本文针对 CO_2 反演精度为 $1 \sim 4 \times 10^{-6}$ 的需求,建立了一套光谱探测系统,通过理论计算、试验验证、光谱定标可知,该系统能够同时满足高光谱分辨率和高信噪比的指标要求。

2 光谱分辨率与信噪比的指标要求

CO_2 探测器是根据大气分子吸收池原理,通过测量 CO_2 和 O_2 的精细吸收光谱,对 CO_2 浓度进行反演,为实现 $1 \sim 4 \times 10^{-6}$ 的反演精度, CO_2 探测器对 3 个谱段的大气吸收光谱进行精细测量的具体技术指标见表 1。

表 1 CO₂ 探测仪 3 个谱段的主要技术指标Tab. 1 Main specifications of three bands of CO₂ sounder

吸收线谱段/ μm	0.76	1.61	2.06
谱段范围/nm	758~778	1 594~1 624	2 041~2 081
地面分辨率/(km \times km)	2 \times 2	2 \times 2	2 \times 2
光谱通道	1 242	500	500
光谱分辨率/nm	0.044	0.13	0.16
信噪比(5%反照率)/ (photon \cdot s ⁻¹ \cdot m ⁻² \cdot sr ⁻¹ \cdot μm^{-1})	360:1@5.8 \times 10 ¹⁹	240:1@2.1 \times 10 ¹⁹	180:1@1.1 \times 10 ¹⁹

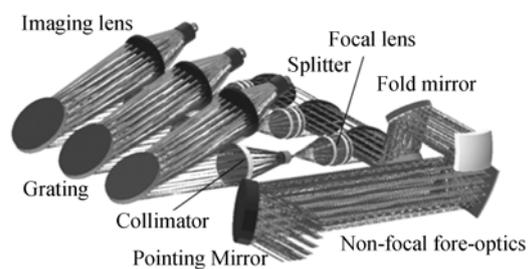
根据表 1 的指标要求,0.76 μm 谱段的光谱通道多达 1 242 个,但光谱分辨率只有 0.044 nm,每个光谱通道的信号能量非常微弱。在反照率 5% 的情况下,信噪比指标为 360 : 1。1.61 μm 和 2.06 μm 两个红外谱段的光谱通道同为 500 个,光谱分辨率分别为 0.13 和 0.16 nm,5% 反照率的信噪比分别是 240 和 180。此外,红外探测器存在本底信号大和暗场噪声大等问题。根据技术指标要求,需要建立一套满足高光谱分辨率与高信噪比的光谱探测系统。

3 光谱探测系统

3.1 光学系统与光栅

根据任务要求,CO₂ 探测仪的光学系统需要具有较强的集光能力和多点同时观测能力。本文采用三通道光栅光谱仪光学系统,它由望远镜、光谱仪准直系统、反射镜、前置光学准直部分、大面积平面衍射光栅和光谱仪成像部分组成(如图 1 所示)。0.76,1.61,2.06 μm 3 个通道共用一套前置系统,为了避免色差和消除杂光,前置光学系统采用带有中间像面的无焦全反射式系统。光束经过分光镜分光,再分别通过 3 片窄带滤光片,获得 3 个谱段所需波长范围的窄带平行光,然后由成像镜分别汇聚在 3 个光谱仪的狭缝上^[10-11]。为了实现极高的光谱分辨率,选择光栅光谱法进行高分辨率光谱分光,采用 140 mm \times 190 mm 的大闪耀角平面衍射光栅作为色散元件。通过狭缝的光经过准直镜照射在衍射光栅上,衍射光栅的一级反射衍射光再经过两片石英透镜成像在探测器上,从而获得大气的精细吸收光谱^[12-13]。

根据选用探测器的色散宽度,精确计算光栅入

图 1 CO₂ 探测仪的光学系统结构图Fig. 1 Optical layout of CO₂ sounder

射角和衍射角的差、成像镜焦距和光栅常数^[14]。

由光栅方程:

$$d(\sin \theta_0 + \sin \theta) = \lambda, \quad (1)$$

其中: θ_0, θ 分别为入射角和衍射角, λ 为衍射波长。光栅的角色散率为:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{1}{d \cos \theta} \quad (2)$$

线色散率为:

$$\frac{dL}{d\lambda} = \frac{d\theta}{d\lambda} \cdot f = \frac{f}{d \cos \theta}, \quad (3)$$

其中 f 为成像系统焦距。对于一定光谱波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$, 可由光栅方程计算该范围的色散角:

$$d(\sin \theta_0 + \sin \theta_1) = \lambda_1, \quad (4)$$

$$d(\sin \theta_0 + \sin \theta_2) = \lambda_2. \quad (5)$$

对于 CO₂ 探测仪,探测器的尺寸是固定的,其色散角可以由探测器尺寸和成像系统焦距求出,即:

$$\Delta\theta = \text{atan}(L/2f), \quad (6)$$

式中: L 为色散长度,即探测器使用的色散范围; f 为成像系统焦距。 θ_1 和 θ_2 可以表示为:

$$\theta_1 = \theta - \Delta\theta, \quad (7)$$

$$\theta_2 = \theta + \Delta\theta. \quad (8)$$

将两个角度分别带入色散方程并相减可得:

$$2\sin \Delta\theta \cos \theta = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{d}. \quad (9)$$

考虑到机械结构的稳定性,入射角和衍射角之间的夹角应保持固定,即:

$$\theta = \theta_0 + \alpha, \quad (10)$$

其中 α 为入射角和衍射角之间的固定夹角。则有:

$$d[\sin \theta_0 + \sin(\theta_0 + \alpha - \Delta\theta)] = \lambda_1, \quad (11)$$

$$2\sin \Delta\theta \cos(\theta_0 + \alpha) = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{d}. \quad (12)$$

二式联立可得:

$$\frac{\sin \theta_0 + \sin(\theta_0 + \alpha - \Delta\theta)}{2\sin \Delta\theta \cos(\theta_0 + \alpha)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (13)$$

在给定波长 λ_1, λ_2 、色散角 $\Delta\theta$ 和衍射角与入射角差 α 的条件下,对上式进行联立求解可以得到入射角 θ_0 和光栅常数 d 。

对于 $0.76 \mu\text{m}$ 谱段, $\lambda_1 = 758 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 778 \text{ nm}$, 焦距 $f = 250 \text{ mm}$, 若探测器尺寸为 28 mm , $\Delta\theta = \text{atan}(14/250) = 3.2^\circ$, 取夹角 $\alpha = 25^\circ, 20^\circ$ 和 15° , 采用数值计算方法得到的入射角和光栅常数见表 2。

表 2 $0.76 \mu\text{m}$ 谱段的入射角和光栅常数

Tab. 2 Incident angles and grating constants in $0.76 \mu\text{m}$ band

夹角/ $^\circ$	25	20	15
入射角/ $^\circ$	34.112	47.282	41.962
衍射角/ $^\circ$	59.112	67.282	56.962
光栅常数/ $(\text{g} \cdot \text{mm}^{-1})$	1 847	2 156	1 961

对于 $1.61 \mu\text{m}$ 谱段, $\lambda_1 = 1 592 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1 642 \text{ nm}$, 焦距 $f = 250 \text{ mm}$, 探测器尺寸为 25 mm , $\Delta\theta = \text{atan}(12.5/250) = 2.862 4^\circ$, 取夹角 $\alpha = 25^\circ, 20^\circ$ 和 15° , 采用数值计算方法得到入射角和光栅常数见表 3。

表 3 $1.61 \mu\text{m}$ 谱段的入射角和光栅常数

Tab. 3 Incident angles and grating constants in $1.61 \mu\text{m}$ band

夹角/ $^\circ$	25	20	15
入射角/ $^\circ$	37.455	41.512	45.614
衍射角/ $^\circ$	62.455	61.512	60.614
光栅常数/ $(\text{g} \cdot \text{mm}^{-1})$	924	953	980

对于 $2.06 \mu\text{m}$ 谱段, $\lambda_1 = 2 040 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 2 100 \text{ nm}$, 焦距 $f = 250 \text{ mm}$, 探测器尺寸为 25 mm , $\Delta\theta = \text{atan}(12.5/200) = 2.862 4^\circ$, 取夹角 $\alpha = 25^\circ, 20^\circ$ 和 15° , 采用数值计算方法得到入射角和光栅常数见表 4。

表 4 $2.06 \mu\text{m}$ 谱段的入射角和光栅常数

Tab. 4 Incident angles and grating constants in $2.06 \mu\text{m}$ band

夹角/ $^\circ$	25	20	15
入射角/ $^\circ$	38.781	42.898	47.061
衍射角/ $^\circ$	63.781	62.898	62.061
光栅常数/ $(\text{g} \cdot \text{mm}^{-1})$	735	758	780

由于两个光轴夹角越小,光谱仪结构的长度越长,选择夹角为 $20^\circ, 0.76, 161, 2.06 \mu\text{m}$ 谱段的平面全息光栅刻线密度分别为 $2 156, 953, 758 \text{ g/mm}$ 。

为了满足 CO_2 浓度的精确反演,一个谱段的光谱通道高达 1 000 个以上,而光谱分辨率最高为 0.044 nm ,这就意味着每个光谱通道的信号强度很弱,对实现高信噪比的光谱探测造成了困难。为了实现高信噪比,经过设计使 3 个谱段的全息光栅在使用波段的衍射效率都在 90% 以上,衍射效率曲线如图 2 所示,满足高光谱分辨率与高信噪比的光谱探测要求。

3.2 探测器选择与像元合并

探测器的选择直接关系到系统光学参数和仪器的性能指标,是实现高光谱分辨率与高信噪比光谱探测的关键。 CO_2 探测仪的探测器包括一块 Si-CCD 面阵探测器、两块短波红外面阵探测器。为了提高响应灵敏度,选择高量子效率的背照式 CCD;为了实现高信噪比,选择大像元尺寸、低噪声和低暗电流的探测器;为了满足高光谱分辨率,选择大格式、像元数多的探测器,同时帧转移型探测器可以降低不同光谱通道之间的串扰。

对于 $0.76 \mu\text{m}$ 谱段,选择英国 E2V 公司的背照式帧转移型探测器 E2V55-30 进行探测,其像元尺寸为 $22.5 \mu\text{m} \times 22.5 \mu\text{m}$,像元数为 $1 242 \times 576$,主要技术参数见表 5。

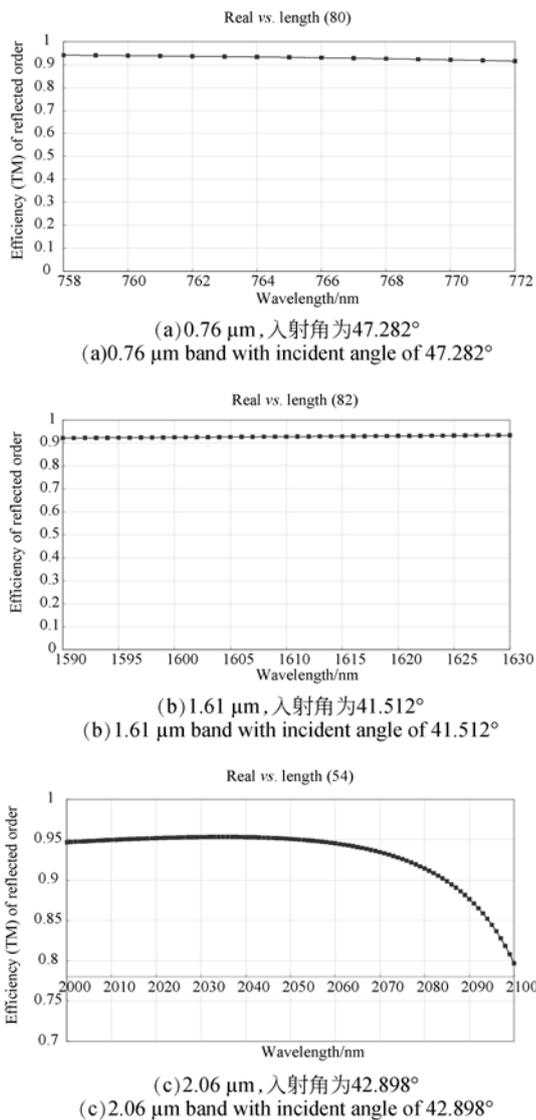


图 2 各谱段光栅衍射效率曲线

Fig. 2 Diffraction efficiency curves of grating

表 5 探测器 E2V55-30 主要技术参数

Tab. 5 Main specifications of detector E2V55-30

主要参数	指标
像元数	1 242(H)×576(V)
像元尺寸	22.5 μm×22.5 μm
输出通道	2
封装形式	Ceramic 44-pin
输出增益	A ₁ :1.2 μV/e A ₂ :3.0 μV/e
读出噪声	4e@10 kHz;9e@1 MHz
最大读出频率	6 MHz
饱和电子数	450 000e
暗信号	65e/(pixel·second ⁻¹ (@°C))
量子效率	>80%

在光学系统相对孔径不变的情况下,增大感光像元尺寸可以有效提高系统的信噪比,因此这里在空间方向对多个像元进行合并。探测器 E2V55-30 采用 16 个像元合并为一个 360 μm 的空间像元,像元尺寸为 360 μm×22.5 μm,如图 3 所示。

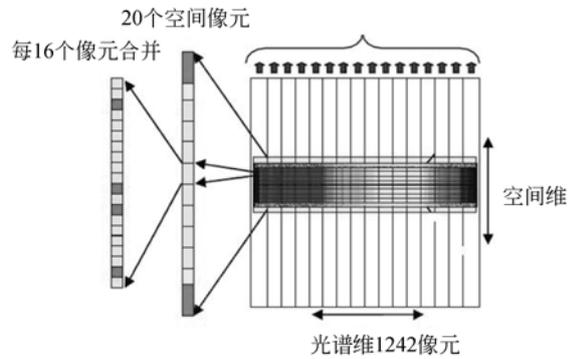


图 3 0.76 μm 谱段探测器像元的合并方法

Fig. 3 Illumination and readout scheme for 0.76 μm band

对于 1.61 μm 和 2.06 μm 谱段,选择相同的法国 SofRadir 公司的 SATURN-SW 型 HgCdTe 红外探测器,其元尺寸为 30 μm×30 μm,像元数为 1 000×256。该探测器采用配套的微型斯特林制冷机,可以提供 1 W 的制冷量,在 20 °C 的典型工作环境下可以制冷至 150 K,制冷时间小于 8 min。主要技术参数见表 6。

表 6 SATURN-SW 型探测器的主要技术参数

Tab. 6 Main specifications of detector SATURN-SW

主要参数	指标
像元数	1 000(H)×256(V)
像元尺寸	30 μm×30 μm
光谱范围	0.8 μm~2.5 μm
FPA 可工作温度	≤200 K
饱和电子数	0.5×10 ⁶ e
动态范围	79 dB
读出噪声	150e
输出通道	2 or 4 (可选)
最大读出频率	8 MHz
帧速率	≤250 Hz(全帧读出)
信号响应均匀性	<7%
线性度	>99.5%
量子效率	>60%

为了提高信噪比,1.61 μm 和 2.06 μm 谱段

也进行了空间像元合并,采用 12 个像元合并为一个 $360 \mu\text{m}$ 的空间像元,像元尺寸为 $360 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,如图 4 所示。

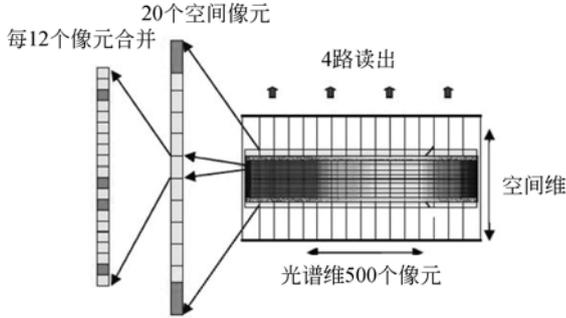


图 4 $1.61 \mu\text{m}$ 和 $2.06 \mu\text{m}$ 谱段探测器像元的合并方法
Fig. 4 Illumination and readout scheme for $1.61 \mu\text{m}$ and $2.06 \mu\text{m}$ bands

受红外探测器的制造工艺和材料不一致等因素的影响,在相同照度下信号输出幅度会出现不均匀性,不均匀性的极端情况就是部分像元失去探测能力,成为盲元。课题组根据盲元点的灰度特征以及梯度突变特性进行动态盲元检测;并采用线性插值法进行盲元补偿,即用相邻像元的平均值代替中心点的盲元,从而提高红外谱段的信噪比^[15-16]。

4 信噪比计算与验证

根据大气光学成像遥感理论,计算 3 个谱段的理论信噪比,并通过真空低温试验对 $1.61 \mu\text{m}$ 谱段进行信噪比测试,以验证高信噪比的光谱探测能力^[17]。

由光学成像遥感的信噪比方程:

$$\text{SNR} = \frac{S_e(\lambda)}{\sqrt{N_e^2 + D_k + S_e(\lambda)}}, \quad (14)$$

其中:

$$S_e(\lambda) = \frac{A_d}{4F^2} \cdot \frac{\lambda}{hC} \cdot T_{in} \cdot \tau_0(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot$$

$$E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot \cos Z \cdot \Delta\lambda, \quad (15)$$

$$L(\lambda) = \frac{\tau_a(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \cos Z}{\pi}. \quad (16)$$

$L(\lambda)$ 可以看作光学系统入瞳处的辐射亮度,该值可以由大气辐射传输计算软件 MODTRAN 计算得到。将式(16)代入式(15),得:

$$S_e(\lambda) = \frac{\pi}{4F^2} \cdot A_d \cdot \frac{\lambda}{hC} \cdot T_{in} \cdot \tau_0(\lambda) \cdot L(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot \Delta\lambda. \quad (17)$$

$L(\lambda)$ 以量子形式表示,得:

$$S_e(\lambda) = \frac{\pi}{4F^2} \cdot L_{\text{photon}}(\lambda) \cdot A_d \cdot T_{in} \cdot \tau_0(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \quad (18)$$

式中: S_e 以电子数表示的探测器器件的信号输出; A_d 为探测器的像元面积 ($22.5 \mu\text{m} \times 16 \times 13.5 \mu\text{m} @ 0.76 \mu\text{m}$; $30 \mu\text{m} \times 12 \times 16 \mu\text{m} @ 1.61 \mu\text{m} \& 2.06 \mu\text{m}$); $F = f/D$, 为光学系统焦距 ($2 @ 0.76 \mu\text{m} \& 1.61 \mu\text{m} \& 2.06 \mu\text{m}$); $\tau_0(\lambda)$ 为光学系统通过率 ($0.3 @ 0.76 \mu\text{m} \& 1.61 \mu\text{m} \& 2.06 \mu\text{m}$); $\tau_a(\lambda)$ 为大气路径光谱透过率; $E(\lambda)$ 为太阳在地面的光谱辐照度; Z 为太阳天顶角; T_{in} 积分时间 ($0.3 \text{ s} @ 0.76 \mu\text{m} \& 1.61 \mu\text{m} \& 2.06 \mu\text{m}$); $\eta(\lambda)$ 为探测器的量子效率 ($0.8 @ 0.76 \mu\text{m}$; $0.6 @ 1.61 \mu\text{m} \& 2.06 \mu\text{m}$); $\Delta\lambda$ 为光谱带宽 ($0.04 \text{ nm} @ 0.76 \mu\text{m}$; $0.12 \text{ nm} @ 1.61 \mu\text{m}$; $0.16 \text{ nm} @ 2.06 \mu\text{m}$); N_e 读出噪声电子数 ($9e @ 0.76 \mu\text{m}$; $339e @ 1.61 \mu\text{m} \& 2.06 \mu\text{m}$); D_k 为暗电流噪声电子数 ($210e @ 0.76 \mu\text{m}$; $1 \times 10^4 e @ 1.61 \mu\text{m} \& 2.06 \mu\text{m}$); C 为光速; $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 为普朗克常数。

由式(18)可以发现,信号电子数与光谱分辨率成反比(光谱分辨率越高,单通道的信号电子数越少),与积分时间和像元尺寸成正比。结合式(14)可知,可见谱段的噪声主要来源于散粒噪声,读出噪声和暗电流噪声可以忽略,系统信噪比与信号电子数的平方根成正比;近红外谱段的读出噪声和暗电流很大,与散粒噪声同量级,系统信噪比近似与信号电子数成正比。光谱分辨率越高,每个光谱通道的信号能量就越弱,所以光谱分辨率与信噪比之间是相互制约的关系。

分别计算 3 个谱段的理论信噪比。对于 $0.76 \mu\text{m}$ 的可见光谱段,典型照度为 $5.8 \times 10^{19} \text{ photons}/(\text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$, $S_e = 7.78 \times 10^4 e$, $N_e = 9e$, $D_k = 210e$ 。代入式(14)得:

空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 时, $\text{SNR} = 278$;

空间分辨率为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 时, $\text{SNR} = 393$ 。

对于 $1.61 \mu\text{m}$ 的红外谱段,典型照度为 $2.1 \times 10^{19} \text{ photons}/(\text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$, $S_e(\lambda) = 1.5 \times 10^5 e$, $N_e < 150e$, $D_k = 1 \times 10^4 e$ 。代入式(14)得:

空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 时, $\text{SNR} = 204$;

空间分辨率为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 时, $\text{SNR} = 288$ 。

对于 $2.06 \mu\text{m}$ 的红外谱段,典型照度为 1.1

$\times 10^{19}$ photons/(s · m⁻² · sr⁻¹ · μm⁻¹), $S_e = 1.0 \times 10^5 e$, $N_e < 150e$, $D_k = 1 \times 10^4 e$ 。代入式(14)得:

空间分辨率为 1 km×2 km 时, SNR=143;

空间分辨率为 2 km×2 km 时, SNR=202。

根据以上计算,分别得到 3 个谱段不同空间分辨率情况下的理论信噪比,见表 5。可以发现,对于 2 km×2 km 的空间分辨率,3 个谱段的理论信噪比都略高于指标要求。

为了验证 CO₂ 探测仪的高信噪比探测能力,将 1.61 μm 单通道演示样机放置在真空罐内,模

拟在轨工作环境,测量该谱段在典型照度 2.1×10^{19} photons/(s · m⁻² · sr⁻¹ · μm⁻¹) 下的信噪比,测试结果如图 5 所示。结果表明在典型照度下,2 km×2 km 空间分辨率的信噪比为 274,接近理论信噪比,实现了高信噪比的光谱探测。

5 光谱分辨率验证

为了验证 CO₂ 探测仪 0.76, 1.61, 2.06 μm 3 个谱段的高光谱分辨率的光谱探测能力,对 3 个谱段进行了光谱定标实验^[18-19]。将 CO₂ 探测仪置于真空罐内,模拟在轨温度(-5 °C)和压力(10⁻³ Pa)状态,分别对 3 个谱段的不同光谱通道进行测试,得到 3 个谱段的线性函数,并对线形函数进行高斯拟合,确定每个光谱通道的中心波长和半宽度。

根据 3 个谱段的光谱分辨率要求,建立了一套光谱定标装置,如图 6 所示。每个谱段采用一台独立的可调谐激光器,瞬时线宽小于 1 MHz。每台激光器通过光纤分别连接积分球以及各自的波长计,波长计用于确定激光器的输出波长^[20]。积分球通过平行光管,入射进真空罐,均匀照亮 CO₂ 探测仪望远镜系统的入瞳。选择不同的视场角,以 0.005 nm 为步长,改变可调谐激光器的输出波长进行扫描,记录 CO₂ 探测仪的输出数据和波长计的数据,确定不同光谱通道的相对光谱响应,对响应曲线进行高斯拟合并做归一化处理^[21-22]。两端响应最大值的 1% 作为该光谱通道的响应带宽,响应最大值二分之一处所对应的波长差作为光谱带宽,即光谱分辨率。拟合的高斯

表 7 三个谱段的理论信噪比

Tab.7 Theoretical SNRs of three bands

谱段/μm	0.76	1.61	2.06
理论 SNR(1 km×2 km)	278	204	143
理论 SNR(2 km×2 km)	393	288	202
SNR 指标(2 km×2 km)	360	240	180

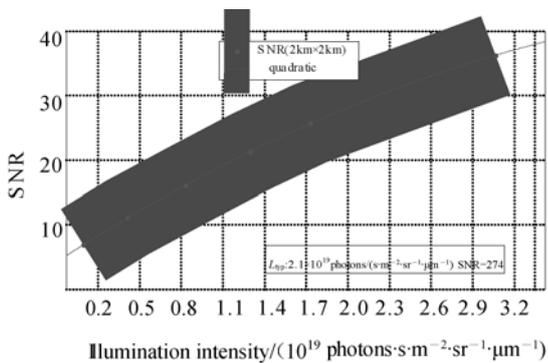


图 5 1.61 μm 谱段的测试信噪比

Fig. 5 Measured SNRs for 1.61 μm band

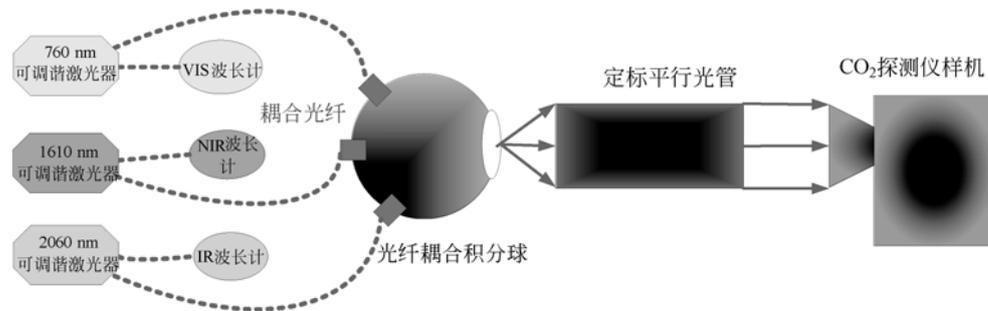
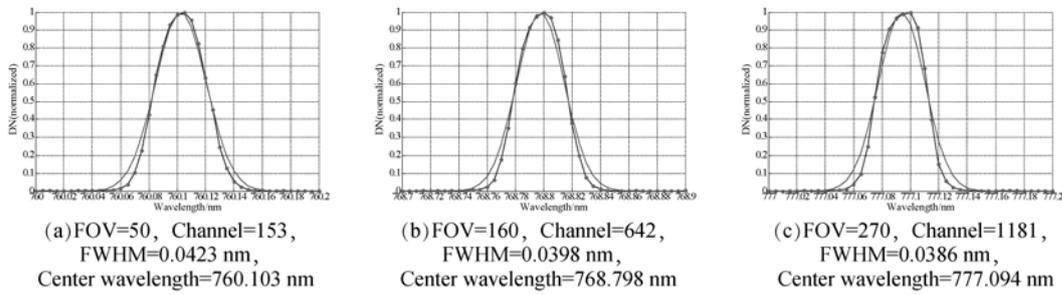
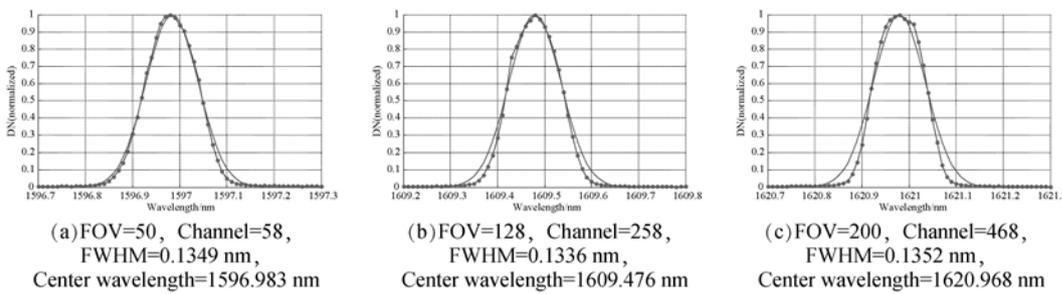
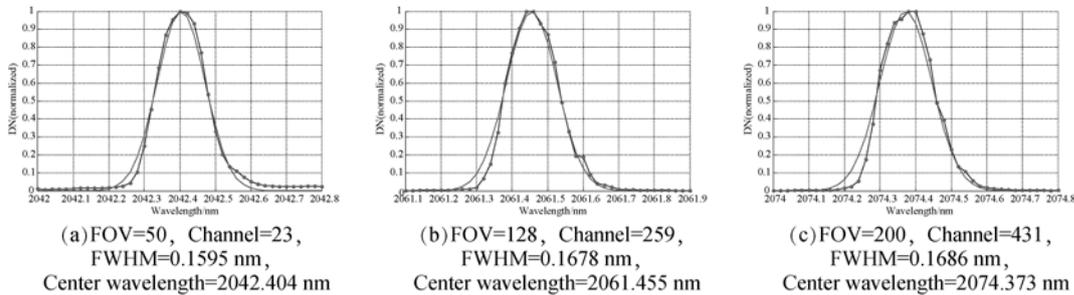


图 6 CO₂ 探测仪光谱定标装置

Fig. 6 Scheme of spectral calibration system for CO₂ sounder

图 7 0.76 μm 谱段 3 个视场点不同光谱通道的相对光谱响应曲线Fig. 7 Relative spectral response curves for different channels on three spatial positions of 0.76 μm band图 8 1.61 μm 谱段 3 个视场点不同光谱通道的相对光谱响应曲线Fig. 8 Relative spectral response curves for different channels on three spatial positions of 1.61 μm band图 9 2.06 μm 谱段 3 个视场点不同光谱通道的相对光谱响应曲线Fig. 9 Relative spectral response curves for different channels on three spatial positions of 2.06 μm band

光谱响应曲线最大值对应的波长位置即为该光谱通道的中心波长。针对 3 个谱段分别选择前、中、后 3 个视场点,测量不同光谱通道的线性函数,测试结果分别如图 7、图 8、图 9 所示。对于 0.76 μm 谱段,光谱响应曲线的半宽度为 0.04(1 \pm 5%) nm;对于 1.61 μm 谱段,光谱响应曲线的半宽度为 0.13(1 \pm 4%) nm;对于 2.06 μm 谱段,光谱响应曲线的半宽度为 0.16(1 \pm 5%) nm。实验结果与设计值相符,满足高光谱分辨率的光谱探测要求。

6 结 论

本文采用光栅光谱法实现精细光谱分光,通过设计保证 3 个谱段的光栅衍射效率在使用波段达到 90% 以上。选择一块 Si-CCD 探测器和两块 HgCdTe 探测器,通过空间维像元合并以及盲元校正等方法实现了高信噪比的光谱探测。同时建立了一套精细光谱定标装置,用于测量不同视场角时各个光谱通道的中心波长和半宽度。实验结

果表明,3 个谱段光谱分辨率分别为 0.04,0.13,0.16 nm,满足高光谱分辨率和高信噪比的光谱

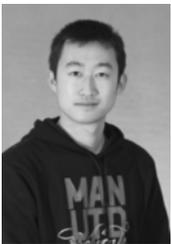
探测需要,从而为 CO₂ 浓度的精确反演奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] MIAO R, LU N, YAO L, *et al.*. Multi-year comparison of carbon dioxide from satellite data with ground-based FTS measurements (2003-2011)[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(7): 3431-3456.
- [2] THOMAS S P, EDWARD T O, HAI N, *et al.*. Global variability of midtropospheric carbon dioxide as measured by the atmospheric infrared sounder [J]. *J. Appl. Remote Sens.*, 2014, 8: 84984.
- [3] 郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状[J]. *中国光学*, 2011, 4(6): 547-561.
- ZHENG Y Q. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 547-561. (in Chinese)
- [4] KUZE A, SUTO H, NAKAJIMA M. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for green-house gases monitoring[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(35): 6716-6733.
- [5] HANSON H, YUEN K, CRISP D. Orbiting Carbon Observatory-2: observing CO₂ from space[J]. *The Earth Observer*, 2014, 26(4):458-465.
- [6] BASILIO R R, POLLOCK H R, SARAH L. OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) mission operations planning and initial operations experiences[J]. *SPIE*, 2014, 9241: 924105.
- [7] MICHAEL B, HEINRICH B, MAXIMILIAN R, *et al.*. Passive satellite remote sensing of carbon dioxide and methane: SCIMACHY, GOSAT, Carbon Sat[J]. *Geophys Res Abstracts*, 2011, 13: 6556.
- [8] KATAOKA F, KNUTESON R O, KUZE A, *et al.*. TIR spectral radiance calibration of the GOSAT satellite borne TANSO-FTS with the aircraft-based S-HIS and the ground-based S-AERI at the railroad valley desert playa [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2014, 52(1): 89-105.
- [9] 梁静秋,梁中翥,吕金光,等. 空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪研究[J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 277-297.
- LIANG J Q, LIANG ZH ZH, LU J G, *et al.*. Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 277-297. (in Chinese)
- [10] 张晓龙,刘英,孙强,等. 消谱线弯曲长波红外成像光谱仪设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 266-273.
- ZHANG X L, LIU Y, SUN Q, *et al.*. Design of long-wave infrared imaging spectrometer with eliminating spectral curvature[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 266-273. (in Chinese)
- [11] 张葆,崔恩坤,洪永丰. 红外双波段双视场共光路光学系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 395-401.
- ZHANG B, CUI E K, HONG Y F. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 395-401. (in Chinese)
- [12] 郑玉权,高志良. CO₂ 探测仪光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 20(12): 2645-2653.
- ZHENG Y Q, GAO ZH L. Optical system design of CO₂ sounder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 20(12): 2645-2653. (in Chinese)
- [13] 高明辉,郑玉权. CO₂ 探测仪单通道光学系统设计验证方法[J]. *中国光学*, 2014, 7(6): 949-955.
- GAO M H, ZHENG Y Q. Valiadation method of single-channel optical system design of CO₂ detector[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 949-955. (in Chinese)
- [14] 姜岩秀,韩建,李文昊,等. 平面全息光栅曝光系统中的分光器件特性分析[J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 241-247.
- JIANG X Y, HAN J, LI W H, *et al.*. Characteristic analysis for different beamsplitters of the plane holographic grating lithography system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 241-247. (in Chinese)
- [15] 张一舟,许廷发,刘子伟,等. 基于 Savitzky-Golay 加权拟合的红外图像非均匀性条带校正方法[J]. *中国光学*, 2015, 8(1): 51-59.
- ZHANG Y ZH, XU T F, LIU Z W, *et al.*. Correction method for stripe nonuniformity in infrared images based on Savitzky-Golay weighted fitting algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 51-59. (in Chinese)
- [16] 张俭民,冯国斌,杨鹏翎,等. 碲镉汞光导探测器在

- 中红外激光测量中的热问题[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(1): 22-30.
- ZHANG J M, FENG G B, YANG P L, *et al.*. Thermal issues of photoconductive HgCdTe detector in mid-infrared laser parameter measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 22-30. (in Chinese)
- [17] 李毅, 吴清文, 陈立恒, 等. 二氧化碳探测仪的热控系统[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(4): 1053-1061.
- LI Y, WU Q W, CHEN L H, *et al.*. Thermal control system of carbon dioxide detection instrument[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1053-1061. (in Chinese)
- [18] DAY J O, O'DELL C W, POLLOCK R, *et al.*. Preflight spectral calibration of the orbiting carbon observatory[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2011, 49(7): 2793-2801.
- [19] SAKUMA F, BRUEGGE C J, RIDER D, *et al.*. OCO/GOSAT preflight cross-calibration experiment[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2010, 48(1): 585-599.
- [20] 张运海, 杨皓, 孔晨旻. 激光扫描共聚焦光谱成像系统[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(6): 1446-1453.
- ZHANG Y H, YANG H, KONG CH H. Spectral imaging system on laser scanning confocal microscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1446-1453. (in Chinese)
- [21] 曹海霞, 吴娜, 冯树龙, 等. 单色仪与成像光谱仪的交互光谱定标[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(10): 2585-2591.
- CAO H X, WU N, FENG SH L, *et al.*. Cross-spectral calibration for monochromator and imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2585-2591. (in Chinese)
- [22] 施建华, 伏思华, 谢文科, 等. 光栅光谱仪光谱响应误差校正[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 483-490.
- SHI J H, FU S H, XIE W K, *et al.*. Error correction of spectral response characteristic of grating spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 483-490. (in Chinese)

作者简介:



张 航(1984—),男,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,2007年、2010年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间高光谱成像技术和焦面电子学设计等方面的研究。E-mail: panni0119_cn@sina.com

导师简介:



王文全(1968—),男,吉林农安人,教授,1995,1998,2001年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事金属合金的磁性研究。E-mail: wang-wq@jlu.edu.cn