

大气CO₂甚高光谱分辨率成像光谱仪分析与光学设计

宋文宝^{1,2} 靳阳明^{1,2} 赵知诚^{1,2*} 沈为民^{1,2} 范东栋³

¹苏州大学物理与光电·能源学部, 江苏 苏州 215006

²教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

³航天东方红卫星有限公司, 北京 100094

摘要 为监测全球范围内CO₂排放,确定碳源碳汇位置,需高精度探测大气CO₂柱浓度。首先介绍遥感卫星探测大气CO₂柱浓度原理,并利用逐线积分辐射传输模型(LBLRTM),分析探测精度、光谱分辨率、信噪比需求之间的相互关系。然后,基于遥感卫星探测要求,分析光学系统指标。根据指标,选择中阶梯浸没衍射光栅分光元件,确定逆卡塞格林结构前置系统和离轴三反消像散结构分光系统。设计了 F 数4、光谱分辨本领21000的大气CO₂柱浓度探测成像光谱仪光学系统。设计的光学系统由1个前置系统、1个分光系统和3块焦平面探测器组成,结构紧凑,体积微小,成像质量良好。

关键词 光学设计; 成像光谱仪; 中阶梯浸没衍射光栅

中图分类号 0436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0722001

Analysis and Optical Design of Very High Spectral Resolution Imaging Spectrometer of the Atmospheric CO₂

Song Wenbao^{1,2} Jin Yangming^{1,2} Zhao Zhicheng^{1,2} Shen Weimin^{1,2} Fan Dongdong³

¹College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

²Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou, Jiangsu, 215006, China

³DFH Satellite Co, Ltd, Beijing 100094, China

Abstract For monitoring the emission of CO₂ in the global scopes, determining the location of carbon sources and sinks, high precision detection of the column concentration of atmospheric CO₂ is needed. First, the principle of remote sensing of the column concentration of atmospheric CO₂ is introduced, and the relationship between detection accuracy, spectral resolution and the required signal to noise ratio (SNR) is analyzed by using the line-by-line radiative transfer model (LBLRTM). Then based on satellite remote sensing requirements, the indexes of the optical system are analyzed. According to the indexes, echelle immersion grating is chosen as light splitting element, the inverse Cassegrain telescope and the off-axis three-mirror anastigmat structure beam splitting system is determined. The optical system of atmospheric CO₂ column concentration detection imaging spectrometer with F number 4 and spectral resolving power of 21000 is designed. This optical system consists of a single telescope, a set beam splitting system and three pieces of focal plane array which has small size and good image quality.

Key words optical design; imaging spectrometer; echelle immersion grating

OCIS codes 010.0280; 010.1030; 220.4830

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-03-24

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)

作者简介: 宋文宝(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计与仪器光学方面的研究。E-mail: 20124239014@suda.edu.cn

导师简介: 沈为民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学设计和仪器光学以及航天遥感技术等方面的研究。

E-mail: swm@suda.edu.cn

*通信联系人。E-mail: keatszao@126.com

1 引 言

CO₂是重要的温室气体,近几十年来,其排放量不断增加,引起的气候问题已经成为全球严重关切的重
大环境问题之一。为了研究CO₂对气候变化和全球生态系统的影响,需要高精度测量大气CO₂柱浓度在全
球范围内的时空变迁,确定碳源碳汇位置,揭示大气、土壤、植被、海洋、化石等碳库间的碳交换规律^[1-2]。为
此,欧盟、日本、美国等国家正在积极研发温室气体监测卫星。

2002年,欧空局将大气痕量气体扫描成像光谱仪(SCIAMACHY)送入低地球轨道^[3],首次验证了利用卫星
观测全球温室气体分布和变化的可行性,主载荷为八通道光栅光谱仪,地面分辨率和CO₂柱浓度探测精度较
低,分别为30 km×60 km和1.4×10⁻⁵,难以获得精确的碳源碳汇分布信息。2009年,日本成功发射了专用于监
测全球大气CO₂和CH₄浓度的温室气体观测卫星(GOSAT)^[4],主载荷是四通道傅里叶变换光谱仪,光谱仪体积
1.2 m×1.1 m×0.7 m,CO₂柱浓度探测精度(3~4)×10⁻⁶,但其地面采样点为孤立圆形区域,采样点之间间隔
160 km,致使其难以获得空间连续的CO₂柱浓度分布信息。2014年,美国NASA成功地将专用于监测大气
CO₂浓度的OCO-2(orbiting carbon observatory-2)卫星送入低地球轨道,地面分辨率和CO₂柱浓度探测精度分
别达到1.29 km×2.25 km和(1~2)×10⁻⁶^[5],其光学系统由1台口径100 mm的卡塞格林望远镜和3台大面积光栅
光谱仪组成,体积1.6 m×0.6 m×0.4 m。

然而,这些专用卫星在取得极大成功的同时,存在着载荷体积大、研制发射成本高等不足。为此,德国
和法国等欧盟国家,正致力于研究开发适用于低成本微小卫星的高性能大气CO₂和CH₄遥感器,提出了
CarbonSat(carbon monitoring satellite)、MicroCarb和Sentinal-5 Precursor方案^[6-8]。本文在借鉴MicroCarb中阶
梯光栅分光方案和Sentinal-5 Precursor浸没衍射光栅分光方案的基础上,采用中阶梯光栅与棱镜组成的中
阶梯浸没衍射光栅分光,能有效减小载荷的体积。设计的大气CO₂柱浓度探测成像光谱仪光学系统结构紧
凑,体积微小,适用于低成本微小卫星大气CO₂遥感器。

2 探测原理

卫星遥感探测大气CO₂柱浓度原理基于分子吸收光谱理论。大气CO₂遥感卫星通常工作于星下点成像
方式,如图1所示,图中A表示太阳,G表示地面,B表示成像光谱仪,由前置系统、分光系统和焦平面探测器
组成。透过大气的太阳辐射经CO₂、O₂等大气分子吸收和地面G漫反射后,再次透过大气到达成像光谱仪B,
经光谱仪前置系统成像于分光系统的入射狭缝上,作为视场光阑,入射狭缝仅让地面条带目标通过,通过狭
缝的光经分光系统色散分光后,在焦平面探测器上形成大气分子的吸收特征谱线。

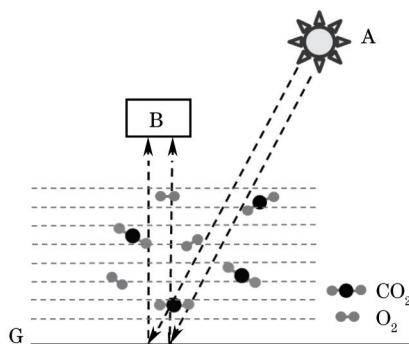


图1 辐射传输路径示意图

Fig.1 Schematic diagram of radiation transmission path

图1所示成像光谱仪B观测到的光谱辐亮度,可表示为仪器入瞳处光谱辐亮度^[5]与仪器光谱响应函数的
卷积,即

$$L(\lambda) = \left\{ L_0(\lambda) r(\lambda, \varphi_0, \theta_0) \left\langle \exp \left\{ - \int_0^S \sum_{m=1}^M [K_m(\lambda) N_m(s)] ds \right\} \right\rangle \right\} \otimes F_{\text{ins}}(\lambda), \quad (1)$$

式中 \otimes 为卷积号, $L_0(\lambda)$ 为大气顶入射太阳光光谱辐亮度, λ 为波长, $r(\lambda, \varphi_0, \theta_0)$ 为地面光谱反照率, φ_0 和 θ_0
分别为太阳天顶角和方位角; $K_m(\lambda)$ 为第 m 种吸收气体分子的光谱吸收截面,表示不同频率的光子被单个第

m 种气体分子吸收的概率; $N_m(s)$ 为辐射传输路径 s 处单位体积内第 m 种吸收气体的分子数, 即第 m 种吸收气体的分子数密度; 积分路径 S 表示入射太阳光从大气顶进入大气层后, 透过大气到达地面, 再由地面到达光谱仪的路径; $\langle \rangle$ 表示对光子所有可能传输的路径求平均; $F_{i,s}(\lambda)$ 表示仪器光谱响应函数。

(1)式表明, 仪器观测到的光谱辐亮度 $L(\lambda)$ 与分子数密度 $N_m(s)$ 正相关。当已知大气顶入射太阳光光谱辐亮度 $L_0(\lambda)$ 、太阳天顶角 φ_0 、方位角 θ_0 、地面光谱反照率 $r(\lambda, \varphi_0, \theta_0)$ 、分子光谱吸收截面 $K_m(\lambda)$ 和仪器光谱响应函数 $F_{i,s}(\lambda)$ 时, 可根据仪器观测到的 CO_2 吸收光谱带内的光谱辐亮度 $L(\lambda)$, 反演得到 CO_2 分子数密度 $N_{\text{CO}_2}(s)$ ^[9]。

然而, 上述得到的 CO_2 分子数密度为 CO_2 绝对浓度, 其精确度受地表气压、地形高程变化等因素影响, 为减小这些因素的影响, 将其转化为大气中 CO_2 相对柱浓度 X_{CO_2} , 其定义为柱体积内 CO_2 与空气分子数量之比^[5], 即

$$X_{\text{CO}_2} = \int_0^Z N_{\text{CO}_2}(s) ds / \int_0^Z N_{\text{air}}(s) ds, \quad (2)$$

式中积分路径 Z 表示由地面到大气顶的垂直路径, $N_{\text{air}}(s)$ 表示大气中空气分子数密度。全球空气中的 O_2 分子数密度 $N_{\text{O}_2}(s)$ 与空气分子数密度 $N_{\text{air}}(s)$ 之比为定值 0.20955 ^[10], 可由 O_2 分子数密度 $N_{\text{O}_2}(s)$ 得到空气分子数密度 $N_{\text{air}}(s)$, 因此 CO_2 柱浓度 X_{CO_2} 可表示为

$$X_{\text{CO}_2} = 0.20995 \int_0^Z N_{\text{CO}_2}(s) ds / \int_0^Z N_{\text{O}_2}(s) ds, \quad (3)$$

上式中的 O_2 分子数密度 $N_{\text{O}_2}(s)$, 可通过探测 O_2 吸收光谱带内的光谱辐亮度和相应的反演算法反演得到。

3 指标分析

全球范围内, 大气 CO_2 柱浓度变化幅度较小, 在北半球, CO_2 柱浓度随季节变化幅度为 $(1.2 \sim 2.2) \times 10^{-5}$, 向南逐渐减弱, 在赤道处为 4×10^{-6} , 在南半球高纬度地区仅为 $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$ ^[11]。P J Rayner^[1]的研究指出, 卫星遥感探测大气 CO_2 , 探测精度优于 2.5×10^{-6} , 数据可有效用于全球 CO_2 源汇分布及其变化分析。所要设计的探测仪运行于海拔 700 km 高的轨道, 每天绕地球 14.6 圈, 地面刈幅宽度 252 km, 地面分辨率 4 km × 6 km, CO_2 柱浓度探测精度 2×10^{-6} 。下面基于卫星遥感探测原理, 结合上述探测要求, 分析探测波段、光谱分辨率和 F 数等光学系统指标。

3.1 探测波段选择

CO_2 吸收光谱带主要有 15、4.3、2.7、2.06、1.61 μm 带, 其中 15、4.3、2.7 μm 带属于强吸收带, 容易使观测仪器饱和, 且受水汽吸收影响大, 不利于高精度探测 CO_2 分子数密度。相比较而言, 1.61 μm 带属于弱吸收带, 观测仪器不易饱和, 且受其他大气成份影响小, 在 CO_2 分子数密度反演精度方面, 具有明显优势^[12]。

O_2 分子数密度可通过探测 0.76 μm O_2 -A 带的光谱辐亮度获得, 此 O_2 -A 带还包含云层和气溶胶分布信息, 与 2.06 μm CO_2 吸收带配合使用, 可提供气压变化与云层和气溶胶散射引起的路径变化信息和大气湿度信息, 提高大气 CO_2 柱浓度反演精度^[13]。因此, 高精度探测大气 CO_2 柱浓度需同时探测 O_2 -A 带 0.758~0.772 μm 、弱 CO_2 波段 1.591~1.621 μm 和强 CO_2 波段 2.044~2.080 μm 三个波段的光谱辐亮度。

3.2 光谱分辨率确定

成像光谱仪探测到的光谱曲线信噪比(SNR)直接影响 CO_2 探测精度, 而信噪比与仪器的光谱分辨率和工作条件密切相关, 为满足 2×10^{-6} 探测精度要求, 需确定探测仪的光谱分辨率和信噪比要求^[14]。

首先, 使用逐线积分辐射传输模型(LBLRTM), 计算大气 CO_2 柱浓度分别为 3.80×10^{-4} 和 3.82×10^{-4} 时仪器入瞳处 1.61 μm 带的光谱辐亮度。然后, 将入瞳处光谱辐亮度与不同半峰全宽(FWHM)的仪器光谱响应函数卷积, 得到不同 FWHM 下仪器观测到的光谱辐亮度。再将 CO_2 柱浓度分别为 3.80×10^{-4} 和 3.82×10^{-4} 时仪器观测到的光谱辐亮度相减, 获得 2×10^{-6} 大气 CO_2 柱浓度变化引起的光谱辐亮度变化, 并将此变化与 3.80×10^{-4} 时光谱辐亮度相比, 得到光谱辐亮度相对变化。最后, 基于不同 FWHM 下, 2×10^{-6} 大气 CO_2 柱浓度变化引起的光谱辐亮度相对变化, 确定探测仪的光谱分辨率和信噪比要求。

计算时, 选择 1976 年美国标准大气模型, 设地表反照率 0.3, 太阳天顶角 30° , 设仪器光谱响应函数为高斯函数, 其 FWHM 常称为仪器的光谱分辨率。图 2 为大气 CO_2 柱浓度为 3.80×10^{-4} , FWHM 分别等于 0.02、0.08、0.14、0.20 nm 时, 仪器观测到的光谱辐亮度曲线。图 2(a) 是 1.591~1.621 μm 波长范围内的光谱辐亮度

曲线,图 2(b)是其中波长 1.607~1.613 μm 的光谱辐亮度曲线。可见仪器光谱响应函数的 FWHM 越小,即光谱分辨率越高,CO₂吸收谱线吸收峰越锐,特征越明显。

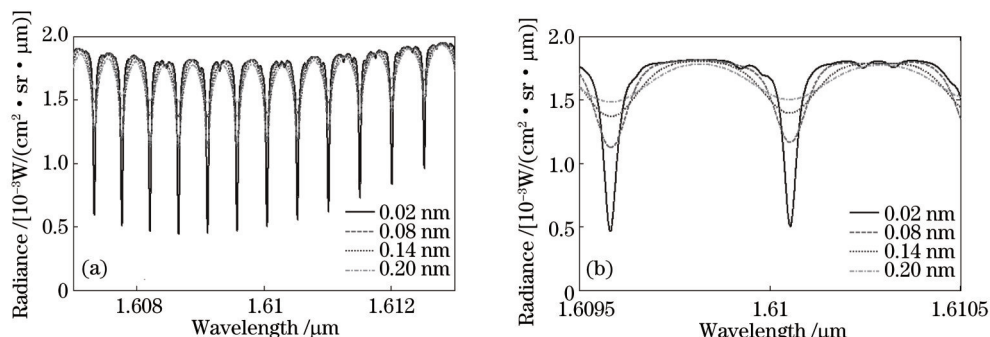


图 2 不同光谱分辨率下光谱辐亮度曲线。(a) 1.591~1.621 μm ; (b) 1.607~1.613 μm

Fig.2 Spectral radiance curves under different spectral resolutions. (a) 1.591~1.621 μm ; (b) 1.607~1.613 μm

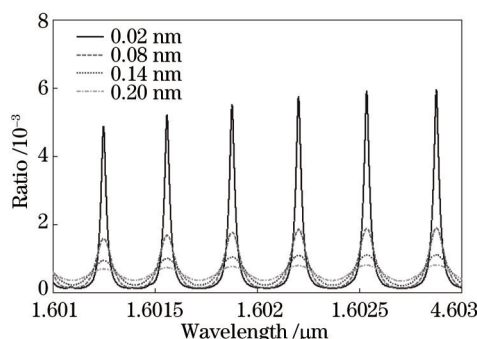


图 3 2×10^{-6} CO₂柱浓度变化引起光谱辐亮度相对变化

Fig.3 Relative change of spectral radiance due to 2×10^{-6} CO₂ concentration change

图 3 为 2×10^{-6} 大气 CO₂ 柱浓度变化引起的光谱辐亮度相对变化曲线。可见,当光谱分辨率为 0.02 nm 时,光谱辐亮度相对变化峰值约为 0.0045。若仪器的工作波长范围只覆盖图 3 中所示的一个相对变化峰-谷周期,为了探得此光谱辐亮度变化,理论上,仪器信噪比至少须为此光谱辐亮度相对变化峰值的倒数,而实际中,仪器信噪比须高于此光谱辐亮度相对变化峰值倒数的 2 倍,才能有效探测此光谱辐亮度变化,即仪器信噪比至少须为 444。当光谱分辨率为 0.20 nm 时,相对变化峰值为 0.0006,则要求信噪比至少须为 3333。表明光谱分辨率越高,仪器探测到的光谱辐亮度对 CO₂ 柱浓度变化越敏感,仪器的信噪比要求越低。

然而,随着仪器光谱分辨率的提高,探测器单个像元接收到的光谱辐射通量降低,限制光谱仪所能达到的信噪比。事实上,若仪器工作波长范围只覆盖一个相对变化峰-谷周期,很难设计出能够达到相应信噪比要求的光谱仪。

一个有效的解决办法是让仪器工作波长范围覆盖 N 个吸收峰,噪声约下降到原来的 \sqrt{N} ,信噪比要求下降为利用单个吸收峰时的 $1/\sqrt{N}$ [11,12,15]。在 CO₂ 弱吸收带 1.591~1.621 μm 波长范围内,对 CO₂ 柱浓度变化敏感的吸收峰有 21 个。表 1 给出了不同光谱分辨率条件下, 2×10^{-6} 大气 CO₂ 柱浓度变化引起的辐亮度相对变化,以及观测 21 个吸收峰时,探测此变化所需信噪比。

表 1 不同光谱分辨率下,探测 2×10^{-6} CO₂ 柱浓度变化所需信噪比

Table 1 SNR for detection of 2×10^{-6} CO₂ concentration change under different spectral resolutions

Resolution/ nm	Relative change of spectral radiance	SNR for detection of 2×10^{-6} CO ₂ concentration change (21 absorption peaks available)
0.02	0.0045	97
0.08	0.0015	300
0.14	0.0009	485
0.20	0.0006	727

综合考虑光学系统体积、设计难度和所需焦平面探测器光谱维像元数限制,本文选择光谱分辨率为 0.08 nm,即光谱分辨本领 21000,此时,要求信噪比至少为 300。

3.3 F 数及其他参数确定

光学系统 F 数是影响仪器信噪比的重要参数。需对仪器进行信噪比分析,以确定满足上述信噪比要求时,光学系统 F 数。在仪器背景噪声和暗电流噪声较小时,仪器信噪比计算式为^[6]

$$V_{\text{SNR}} = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot j \cdot \lambda \cdot \tau(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot V_{\text{QE}}(\lambda) \cdot T_1 \cdot m \cdot \Delta\lambda \cdot L(\lambda, r_g, \varphi_0)}{4 \cdot F^2 \cdot h \cdot c} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot n \cdot \lambda \cdot \tau(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot V_{\text{QE}}(\lambda) \cdot T_1 \cdot m \cdot \Delta\lambda \cdot L(\lambda, r_g, \varphi_0)}{4 \cdot F^2 \cdot h \cdot c} + n_{\text{read}}^2} \quad (4)$$

式中 a 和 b 表示焦平面探测器像元长度和宽度; j 表示探测器空间维像元合并数; $\tau(\lambda)$ 表示光学系统透射率; $\eta(\lambda)$ 表示分光元件光能利用率; $V_{\text{QE}}(\lambda)$ 表示探测器量子效率; T_1 表示积分时间; m 表示光谱过采样率,即在一个仪器光谱响应函数半高全宽内的采样数,根据采样定理,需不小于 2; $\Delta\lambda$ 表示光谱采样间隔,其值为光谱分辨率与光谱过采样率之比; $L(\lambda, r_g, \varphi_0)$ 表示波长 λ 处,太阳天顶角 φ_0 、地面反照率 r_g 时,光学系统入瞳处辐亮度,可通过 LBLRTM 模拟得到; n_{read} 表示读出噪声; h 表示普朗克常数; c 表示真空中光速。

典型地,选择 a 和 $b=20$ mm, $j=4$, $\tau(\lambda)=0.7$, $\eta(\lambda)=0.75$, $V_{\text{QE}}(\lambda)=0.8$, $T_1=0.5$ s, $m=2.5$, $\Delta\lambda=0.032$ nm, $r_g=0.3$, $\varphi_0=30^\circ$, $n_{\text{read}}=50e^-$,代入(4)式,计算得到的仪器信噪比在 1.591~1.621 μm 波长范围内最低值,随 F 数变化曲线如图 4 所示。表明 F 数越小,仪器信噪比越高,为满足信噪比优于 300 的要求, F 数需小于 4.2,为留有一定余量,取 F 数为 4。

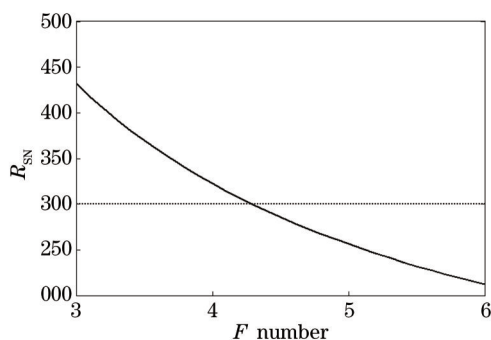


图 4 信噪比随 F 数变化曲线

Fig.4 Curve of SNR varies with F number

参考已经成功发射的 GOSAT 和 OCO-2,大气 CO_2 柱浓度探测成像光谱仪三个波段中,弱 CO_2 波段对仪器的光谱分辨能力和信噪比要求最高^[4,16]。 O_2 -A 带和强 CO_2 波段取与弱 CO_2 波段相同的光谱分辨能力、光谱过采样率和 F 数。

由探测器地面刈幅宽度 L 和轨道高度 H ,可根据关系式 $f_{\text{FOV}} = 2 \arctan[L/(2H)]$,确定前置系统视场(FOV)为 20° 。根据上述选择的典型焦平面探测器像元尺寸 a 、空间维像元合并数 j 、轨道高度 H 和穿轨方向地面分辨率 l ,可根据关系式 $f_{\text{tel}} = ja(H/l)$,确定前置系统焦距 f_{tel} 为 14 mm。分光系统放大率选择 1:1,狭缝宽度取探测器像元尺寸与光谱过采样率之积,即 50 μm 。由探测器像元尺寸 a 、空间维像元合并数 j 、狭缝宽度和前置系统焦距 f_{tel} ,确定探测器瞬时视场(IFOV)为 $0.327^\circ \times 0.205^\circ$,对应 4 km \times 2.5 km 地面像元。探测器积分时间 T_1 内,探测器在地面推扫距离为 3.5 km,实现地面分辨率 4 km \times 6 km。

探测器三个波段的光谱采样数,由各波段宽度与光谱分辨率之比乘以光谱过采样率确定,分别为 961、928、912,谱面宽度为光谱采样数与像元尺寸之积,即 19.22、18.56、18.34 mm。基于上述分析,表 2 列出了仪器的性能指标和设计参数。

表 2 仪器的性能指标和设计参数

Table 2 Instrument performance and design parameters

Parameters	Values		
Orbit altitude /km	700		
Swath width /km	252		
Ground resolution /km	4×6		
FOV /(°)	20		
IIFOV /(°)	0.327×0.205		
<i>F</i> -number	4		
Entrance slit size /mm	5×0.05		
Spectral range /μm	0.758~0.772	1.591~1.621	2.044~2.080
Spectral resolution /nm	0.036	0.08	0.098
Detector pixel size /μm	20×20	20×20	20×20
Spectral width /mm	19.22	18.56	8.34

4 设计思想

4.1 分光元件选择

成像光谱仪采用的分光方式和元件直接影响其性能、体积和重量。目前星载成像光谱仪主要采用的分光方式有棱镜色散型、傅里叶变换型和光栅色散型^[17]。棱镜色散型能量利用率高,不存在光谱级次相互重叠问题,但其光谱分辨本领低,难以满足 21000 要求。傅里叶变换型光谱分辨本领高,获得的原始数据为干涉图,并非光谱数据,数据量大,处理繁琐,一个工作波段对应一台傅里叶变换型光谱仪,光学系统体积大。衍射光栅色散型具有光谱分辨本领高,窄波段内衍射效率高,直接获得光谱数据,信号保真度高等优点。基于大气 CO₂ 柱浓度探测成像光谱仪共有三个波段,各波段带宽窄,中阶梯浸没衍射光栅,兼具中阶梯光栅可同时使用多个衍射级次和浸没衍射光栅能提高光谱分辨本领的特点^[18,19],采用中阶梯浸没衍射光栅分光,实现光学系统体积微小。

中阶梯浸没衍射光栅示意图如图 5 所示, α 、 β 为准直光束在平面 P₁ 上入射角、折射角, i 、 θ 为光束在刻槽面 P₂ 上入射角和衍射角, γ 、 ξ 为成像光束在平面 P₁ 上入射角、折射角。入射光经平面 P₁ 折射后,通过折射率为 n 的介质入射到刻槽面 P₂,经光栅衍射后,返回通过介质,经 P₁ 折射后出射。

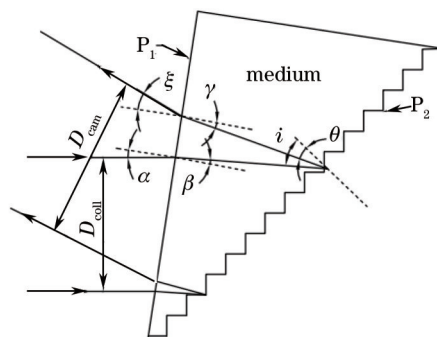


图 5 浸没衍射光栅示意图

Fig.5 Schematic diagram of immersed grating

光线传输满足如下关系:

$$\sin \alpha = n \sin \beta, \tag{5}$$

$$n(\sin i + \sin \theta) = k\rho\lambda, \tag{6}$$

$$n \sin \gamma = \sin \xi, \quad (7)$$

式中 k 为光栅衍射级次, ρ 为光栅槽密度。根据上式可得到浸没衍射光栅角色散率

$$\frac{d\xi}{d\lambda} = \frac{n \cos \gamma}{\cos \xi} \cdot \frac{(\sin i + \sin \theta)}{\lambda \cos \theta}. \quad (8)$$

基于几何光学,宽度为 Δx 的入射狭缝的单色像宽度 $\Delta x'$ 可表示为

$$\Delta x' = \frac{f_{\text{cam}} \cos \alpha \cos i \cos \gamma}{f_{\text{coll}} \cos \beta \cos \theta \cos \delta} \Delta x, \quad (9)$$

式中 f_{coll} 和 f_{cam} 分别为准直系统和成像系统焦距。

光谱分辨率 $\delta\lambda$ 与狭缝的单色像宽度 $\Delta x'$ 的关系为^[18]

$$\delta\lambda = \frac{\Delta x' d\lambda}{f_{\text{cam}} d\xi}, \quad (10)$$

将(5)~(10)式代入光谱分辨本领的定义式 $R = \lambda/\delta\lambda$, 得到

$$R = \frac{n \sqrt{1 - \sin^2 \alpha / n^2}}{\cos \alpha} \cdot \frac{(\sin i + \sin \theta) f_{\text{coll}}}{\cos i \Delta x}, \quad (11)$$

在 $|\alpha| \leq 30^\circ$ 时, $\frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha / n^2}}{\cos \alpha} n \approx n$, 则光谱分辨本领 R 可表示为

$$R = n \frac{(\sin i + \sin \theta) f_{\text{coll}}}{\cos i \Delta x}. \quad (12)$$

(12)式表明,在理想光学系统中,浸没衍射光栅光谱分辨本领 R 由浸没材料折射率 n 、入射角 i 、衍射角 θ 、准直系统焦距 f_{coll} 和狭缝宽度 Δx 决定。

大气 CO_2 柱浓度探测成像光谱仪三个波段光谱分辨本领相同,根据光栅方程,适当选择三个波段各自使用的衍射级次 k ,使得在折射率 n 、入射角 i 和光栅槽密度 ρ 相同条件下,三个波段中心波长光束衍射角 θ 近似相等,实现三个波段共用一个分光系统。

另外,由(12)式可以看出,在光谱分辨本领 R 、入射角 i 、衍射角 θ 和狭缝宽度 Δx 一定时,使用浸没材料折射率为 n 的浸没衍射光栅,准直系统焦距 f_{coll} 约减小 n 倍,进而光学系统体积约减小到原来的 $1/n^3$ 倍。

4.2 光学系统结构确定

大气 CO_2 柱浓度探测成像光谱仪采用中阶梯浸没衍射光栅分光,三个波段共用一个前置系统和分光系统,波长范围为 $0.758 \sim 2.080 \mu\text{m}$ 。如果采用透射系统,色差很难校正。反射系统具有无色差、结构紧凑的优点^[20]。鉴于 CO_2 柱浓度探测成像光谱仪前置系统需有大线视场,中等相对孔径以及较小焦距,采用逆卡塞格林两反结构^[21]。该系统由两片共光轴反射镜组成,为了避免中心遮拦,视场离轴使用。

分光系统中,光栅工作于近 Littrow 条件,孔径光阑置于光栅上,准直系统采用与成像系统相同但倒置的光学结构。分光系统可看作关于光阑对称的系统,彗差和畸变因对称性抵消,球差、像散和场曲为准直和成像系统球差、像散和场曲相互叠加。这样的对称结构布局不仅有利于横向色差校正工作,也使得系统结构简单紧凑。三反消像散结构在物面位于无穷远,三片反射镜均为二次曲面,焦距一定条件下,共有 7 个自由变量^[22],可用其中 3 个校正球差、像散和场曲,用剩余 4 个安排系统结构。视场离轴使用,避免中心遮拦,且能提供较长后工作距。基于此,分光系统采用离轴三反消像散结构,准直系统与成像系统共用三片共光轴反射镜。

5 设计结果

图 6 为设计的光学系统光路图,三个波段共用前置系统和分光系统,系统尺寸 $230 \text{ mm} \times 170 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 。入射光经由反射镜 M1、孔径光阑 T、反射镜 M2 组成的逆卡塞格林前置系统后成像到竖直放置的入射狭缝 O 处,通过狭缝的光经过由 M3、M4、M5 三片反射镜组成的准直系统准直后,入射到中阶梯浸没衍射光栅 IG,三个波段由中阶梯光栅三个不同衍射级次衍射后,再次经过由 M5、M4、M3 三片反射镜组成的成像系统,并通过二向色性分光镜分离,透过相应波段的窄带滤光片后,分别成像到焦平面探测器 I1、I2、I3。表 3 为光学系

统结构参数, M1、M2、M5为二次曲面反射镜, M3为六次非球面反射镜, M4为球面反射镜, M6为平面转折反射镜。浸没光栅尺寸 65 mm×70 mm×85 mm, 槽密度 165.8 lp/mm, O₂-A 波段、弱 CO₂波段和强 CO₂波段分别使用的衍射级次为 19级、9级和 7级, 三个波段各自中心波长入射角均为 52.3°, 衍射角约为 55.3°, 浸没材料为 N-PK52A, 在 0.758~2.080 μm 波长范围内每 10 mm 透射率为 0.995。

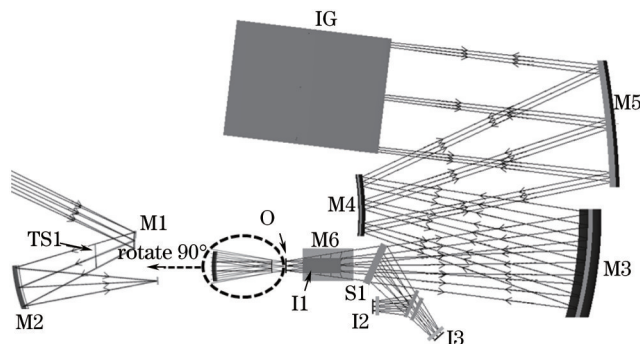


图 6 光学系统光路图

Fig.6 Optical system layout

表 3 系统结构参数

Table 3 Parameters of the system structure

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	-e ²	6 th order
Object	Inf	Inf	-	-
M1	46.3	-12.5	5.858	-
T	Inf	-19.1	-	-
M2	45.2	38.5	0.181	-
O	Inf	168.4	-	-
M3	-230.4	-128.2	0.174	-3.626×10 ⁻¹⁴
M4	145.1	138.0	-	-
M5	-492.9	-127.2	-1.551	-
	Inf	-61.0	-	-
G	Inf	61.0	-	-
	Inf	127.2	-	-
M5	-492.2	-138.0	-1.551	-
M4	145.1	128.2	-	-
M3	-230.4	-125.2	0.174	-3.626×10 ⁻¹⁴
	Inf	-4.0	-	-
S1	Inf	-24.0	-	-
M6	Inf	20.7	-	-
I1	Inf	-	-	-

图 7(a)~(c)分别是系统 O₂-A 波段、弱 CO₂波段和强 CO₂波段中心波长不同视场处调制传递函数(MTF)曲线图。可以看出,在探测器奈奎斯特频率 25 lp/mm 处,MTF 最低值高于 0.66,系统成像质量良好。

图 8(a)是系统弱 CO₂波段中心波长不同视场光线追迹点列图。图中方框代表焦平面探测器像元尺寸,圆代表艾里斑大小,可见光线追迹点列图集中在一个像元内。图 8(b)是系统弱 CO₂波段中心波长不同视场衍射能量集中度曲线,横坐标为包围框到像斑质心的距离,最大值取像元尺寸一半,纵坐标为单个像元尺寸范围内所集中的衍射能量百分数。表明在单个探测器像元范围内的衍射能量集中度高于 80%。

图 10(a)和(b)分别为分光系统谱线弯曲曲线和色畸变曲线图,其横坐标均为归一化视场,纵坐标为相应视场的谱线弯曲和色畸变值。可以看出,系统谱线弯曲较为严重,最大值为 30 μm,需要通过光谱定标加以校正。色畸变较小,最大值为 3.8 μm,小于五分之一像元。

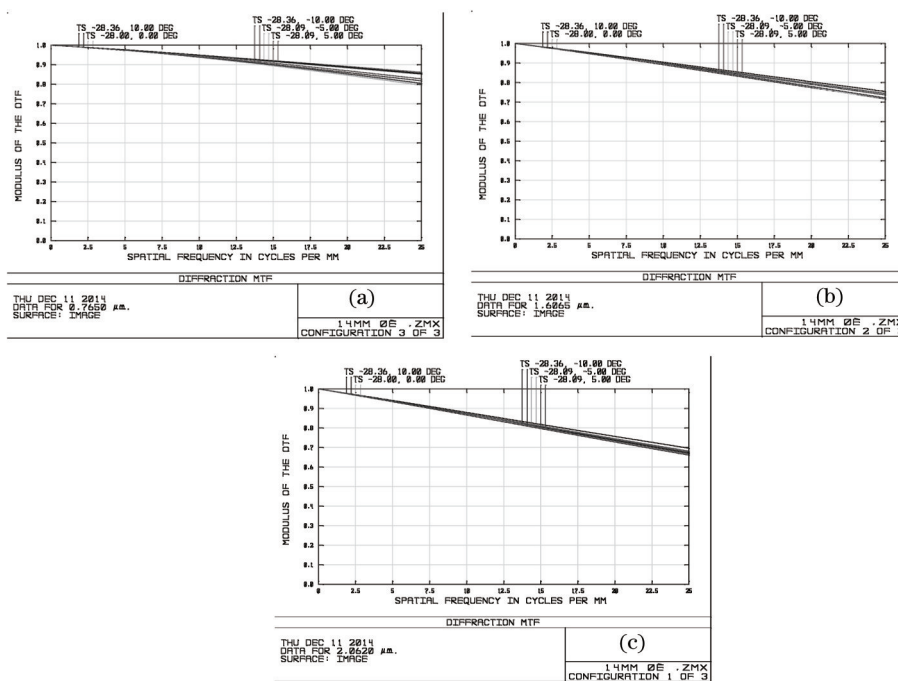


图 7 不同波长 MTF 曲线。(a) 0.765 mm; (b) 1.6065 mm; (c) 2.062 mm
 Fig.7 MTF curves with different wavelengths. (a) 0.765 mm; (b) 1.6065 mm; (c) 2.062 mm

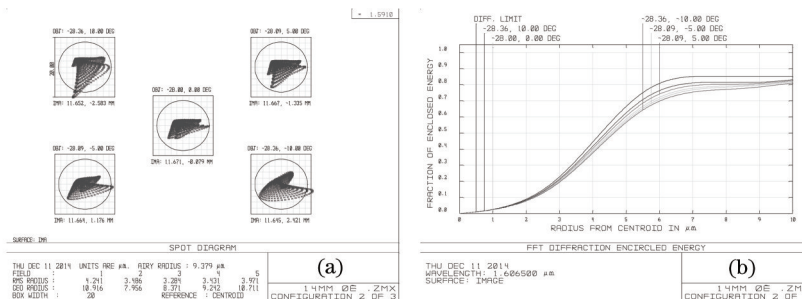


图 8 (a)光线追迹点列图和(b)衍射能量集中度曲线
 Fig.8 (a) Spot diagram of ray tracing and (b) encircled energy curves of diffraction

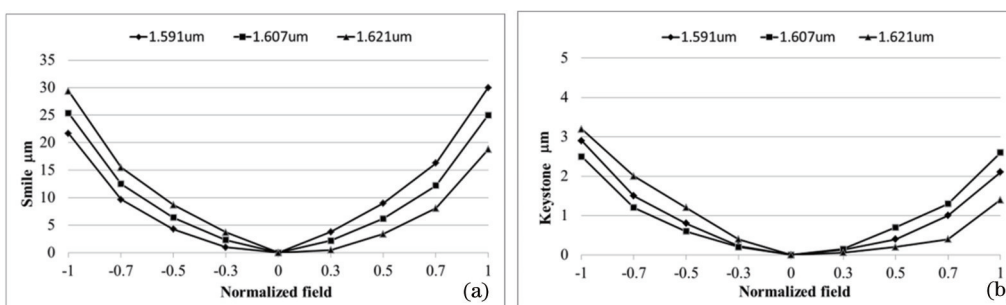


图 9 (a) 谱线弯曲曲线和(b)色畸变曲线
 Fig.9 (a) Smile distortion curves and (b) keystone curves

6 结 论

讲述了遥感探测大气 CO₂柱浓度原理,利用逐线积分辐射传输模型数值分析探测精度、光谱分辨率、所需信噪比之间的相互关系。分析结果表明,仪器光谱分辨率越高,CO₂吸收谱线吸收峰特征越明显,仪器探测到的光谱辐亮度对 CO₂柱浓度变化越敏感,探测仪的信噪比要求越低。基于探测原理与指标分析确定了光学系统设计参数。针对大气 CO₂探测仪光学系统体积大问题,通过采用中阶梯浸没衍射光栅作为分光元件,设计了

体积微小的大气CO₂柱浓度探测成像光谱仪光学系统。该系统结构紧凑、体积小,符合航天用有效载荷轻小要求,适用于多波段、高光谱分辨率的光谱仪。设计的CO₂柱浓度探测成像光谱仪探测精度和地面分辨率较OCO-2低,今后将增大光学系统相对孔径,提高信噪比,进一步提高探测精度和地面分辨率。

参 考 文 献

- 1 P J Rayner, D M. O' Brien. The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(1): 175-178.
- 2 Yu Haili, Hu Shunxing, Wu Xiaoqing, *et al.*. Measurement of CO₂ concentration profiles of lower-troposphere with Raman lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0801003.
于海利, 胡顺星, 吴晓庆, 等. 拉曼激光雷达探测低对流层大气二氧化碳分布[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0801003.
- 3 H Bovensmann, J P Burrows, M Buchwita, *et al.*. SCIAMACHY: mission objectives and measurement modes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(2): 127-150.
- 4 Akihiko Kuze, Hiroshi Suto, Masakatsu Nakajima, *et al.*. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(35): 6716-6733.
- 5 David Crisp, Hartmut Boesch, Linda Brown, *et al.*. OCO (Orbiting Carbon Observatory)-2, Level 2 Full Physics Retrieval Algorithm Theoretical Basis[R]. 2010.
- 6 H Bovensmann, M Buchwitz, J P Burrows, *et al.*. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO₂ emissions from space and related applications[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3: 781-811.
- 7 Christian Buil, Veronique Pascal, Jacques Loesel, *et al.*. A new space instrument concept for the measurement of CO₂ concentration in the atmosphere[J]. *SPIE*, 2011, 8176: 817621.
- 8 J P Veefkind, I Aben, K McMullan, *et al.*. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 70-83.
- 9 Wu Jun. Research on Radiative Transfer Characteristics and Retrieval Methods for Atmospheric CO₂ Monitoring[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013, 65-88.
吴 军. 大气CO₂辐射传输特性与反演方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学博士论文, 2013, 65-88.
- 10 David Crisp, Charles E Miller, Philip L Decola. NASA Orbiting Carbon Observatory: measuring the column averaged carbon dioxide mole fraction from space[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2008, 2(1): 023508.
- 11 Jianping Mao, S Randolph Kawa. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(4): 914-927.
- 12 Wu Jun, Wang Xianhua, Fang Yonghua, *et al.*. Ability analysis of spatial heterodyne spectrometer in atmospheric detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0101001.
吴 军, 王先华, 方勇华, 等. 空间外差光谱技术应用于大气二氧化碳探测的能力分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0101001.
- 13 Zhiming Kuang, Jack Margolis, Geoffrey Toon, *et al.*. Spaceborne measurements of atmospheric CO₂ by high-resolution NIR spectrometry of reflected sunlight: An introductory study[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(15): 11-1~11-4.
- 14 Fu Qiang, Xiangli Bin, Jing Juanjuan. System signal-to-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0211001.
付 强, 相里斌, 景娟娟. 基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0211001.
- 15 Wang Qian, Yang Zhongdong, Bi Yanmeng. Spectral parameters and signal-to-noise ratio requirement for CO₂ hyper spectral remote sensor[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(5): 600-609.
王 倩, 杨忠东, 毕研盟. CO₂高光谱遥感仪器的光谱参数和信噪比需求[J]. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 600-609.
- 16 Stacey Boland, Hartmut Bosch, Linda Brown, *et al.*. The Need for Atmospheric Carbon Dioxide Measurements from Space: Contributions from a Rapid Reflight of the Orbiting Carbon Observatory[R]. 2009.
- 17 Zheng Yuquan, Wang Hui, Wang Yifan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2629-2637.
郑玉权, 王 慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2629-2637.
- 18 D Lee, J R Allington-Smith. An experimental investigation of immersed gratings[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2000, 312(1): 57-69.

- 19 Tang Qian, Qiu Yuehong, Zhao Baochang, *et al.*. Research of the immersion grating diffraction pattern[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(11): 1105002.
唐 茜, 邱跃洪, 赵葆常, 等. 浸入式光栅衍射强度图样研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(11): 1105002.
- 20 Zhang Xuemin, Han Juan, Duan Jiayou, *et al.*. Alignment method of coaxial eccentric-pupil three-mirror system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0416003.
张学敏, 韩 娟, 段嘉友, 等. 共轴偏光瞳折轴三反射光学系统装调方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0416003.
- 21 Zhou Zhengping, Zhao Zhicheng, Jin Yangming, *et al.*. Analysis and design of unobscured flat-field two-mirror telescopic objective with wide field of view and large relative aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0322002.
周正平, 赵知诚, 靳阳明, 等. 大相对孔径宽视场无遮拦平场两反射镜望远物镜分析与设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0322002.
- 22 Pan Junhua. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces*[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004, 130-141.
潘君骅. *光学非球面的设计、加工与检测*[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004, 130-141.

栏目编辑: 韩 峰