

引用格式: LU Yue-lin, WANG Yu, SI Fu-qi, et al. CCD Imaging System Design for Geostationary Satellite-borne Differential Optical Absorption Spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6):0611001
鲁月林,王煜,司福祺,等. 静止轨道星载差分吸收光谱仪 CCD 成像系统设计[J]. 光子学报,2020,49(6):0611001

静止轨道星载差分吸收光谱仪 CCD 成像系统设计

鲁月林^{1,2}, 王煜³, 司福祺¹, 周海金¹, 常振¹, 奚亮^{1,2}

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学 合肥 230026)

(3 安徽大学物质科学与信息技术研究院 合肥 230601)

摘要: 静止轨道卫星差分吸收光谱仪采用摆扫成像方式对大气进行探测, 针对其工作时 CCD 成像系统信噪比大于 1 000、高速探测模式下探测周期小于 10 min、高分辨率模式下探测周期小于 1 h 的要求, 进行 CCD 成像系统设计。选取 CCD47-20 作为探测器, 设计成像电路实现光谱图像信号的采集和上传。分析了帧叠加和像元合并对时间、空间分辨率的影响。结合帧转移 CCD 的特点设计了每个位置最后一帧读出时摆镜转动的成像方式, 并合理设置了帧叠加数和像元合并数, 达到优化成像周期的目的。1 s 曝光时间条件下, 该 CCD 成像系统的高速、高分辨率模式探测周期分别为 515 s 和 3 315 s, 图像信噪比均大于 1 000, 污染物观测实验中未出现失帧或重复的现象, 该 CCD 成像系统方案满足静止轨道星载差分吸收光谱仪的探测需求, 为静止轨道环境监测仪器设计提供参考。

关键词: 遥感探测; 成像光谱仪; 光谱图像; 面阵 CCD; 时序设计

中图分类号: TP73

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204906.0611001

CCD Imaging System Design for Geostationary Satellite-borne Differential Optical Absorption Spectrometer

LU Yue-lin^{1,2}, WANG Yu³, SI Fu-qi¹, ZHOU Hai-jin¹, CHANG Zhen¹, XI Liang^{1,2}

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: The geostationary satellite-borne differential optical absorption spectrometer detects the atmosphere by whiskbroom imaging. Aiming at the requirements of signal-to-noise ratio bigger than 1 000 and the spectrometer's detection period of less than 10 min in high-speed detection mode and less than 1 h in high-resolution mode, the CCD imaging system was designed. Selecting CCD47-20 as the detector, the imaging circuit was designed to realize the sample and upload of image signal. The effects of frame co-added and binning on the time and spatial resolution were analyzed. Combined with the characteristics of the frame transfer CCD, the imaging method of swinging the mirror when reading the last frame of each position was designed, and the number of frame co-added and binning were set reasonably to achieve the purpose of optimizing the imaging cycle. Under 1 s exposure time, the detection period is 515 s in high-speed mode and 3 315 s in high-resolution mode, and the signal-to-noise ratio is greater than 1 000 in both two modes. In the pollutant observation experiment, there is no missing frames or duplication occurred. The CCD imaging system meets the detection requirements of the geostationary spaceborne differential optical absorption spectrometer, and provides a technical reference for the design of a spectrometer.

基金项目: 国家重点研发计划(Nos. 2016YFC0200401, 2017YFB0503901), 国家自然科学基金(No. 61905256)

第一作者: 鲁月林(1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光电子技术. Email: yllu@iofm.ac.cn

导师(通讯作者): 王煜(1971—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电子技术. Email: yuwang@iofm.ac.cn

收稿日期: 2020-02-15; **录用日期:** 2020-04-14

<http://www.photon.ac.cn>

imaging system eventually applied to a geostationary satellite.

Key words: Remote sensing; Imaging spectrometer; Spectral image; Array CCD; Timing design

OCIS Codes: 110.6915; 040.1520; 040.1490; 330.6130

0 引言

卫星遥感具有监测范围广、获取信息量丰富、可长期动态监测等优势^[1],是监测大气污染物的有效手段。大气层制图扫描成像吸收频谱仪(Scanning Image Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography,SCIAMACHY)、臭氧监测仪(Ozone Monitoring Instrument,OMI)^[2-3]以及大气痕量气体差分吸收光谱仪^[4-5]等成像光谱仪对对流层污染气体进行全球观测,获得了充分的大气污染分布和时空变化数据。但是搭载于低轨道卫星平台的仪器,在进行大气环境监测时存在时间分辨率、空间分辨率以及信噪比的限制,无法满足更高精度的反演,以及观测污染物排放和化学循环过程的需求。位于静止轨道的仪器可以在白天提供高频次的测量,同时由于可以“凝视”地面,空间分辨率和信噪比将获得提高,这些优势对于观察和分析复杂的动态空气污染水平和化学物质至关重要^[6]。美国、韩国和欧盟均开展了静止轨道对流层污染气体监测项目,如美国的TEMPO仪器将以1 h的时间分辨率观测北美洲上空,提供实时空气质量产品^[7-9]。目前我国的静止轨道星载差分吸收光谱仪正处于预研阶段,该光谱仪工作时光线经过分光系统进行光谱展开后投射到电荷耦合器(Charge-coupled Device,CCD)上,CCD成像系统将其转化为光谱图像数据。该数据经过处理后即可通过差分吸收光谱算法(Differential Optical Absorption Spectrometer,DOAS)进行气体成分反演,从而获取对流层、平流层内的气体污染物如O₃、NO₂、HCHO和SO₂的浓度分布信息,因此CCD获取光谱图像数据的质量对光谱仪的性能影响极大。

CCD成像系统目前已应用于天文观测、对地遥感等领域^[10-12],对CCD成像系统的指标要求包含信噪比、成像速率、动态范围等。马庆军等对紫外临边成像光谱仪CCD电路系统进行了研究,通过多次电荷倾倒将曝光时间降低到19 ms,系统动态范围约为 2.5×10^5 ^[13]。梁少林等利用CCD55-30作为图像传感器,提出反向转移的时序,在80%饱和曝光时成像信噪比为54.36 dB,动态范围为61.55 dB^[14]。常振等基于帧转移CCD的特性,使用两次帧转移一次水平读出的方法,实现了CCD47-20的10 ms曝光,系统信噪比达到46.8 dB^[15]。以上研究的对象是单独工作时的CCD成像系统,未涉及摆镜与CCD成像系统的配合。而静止轨道星载差分吸收光谱仪在工作时,由于其步进式摆扫成像的特点,CCD成像系统的时序与摆镜的运动密切相关。为了满足CCD成像系统信噪比以及探测周期等要求,本文进行了CCD的选型、电路的结构设计并结合帧转移CCD的特点设计了符合摆扫成像的成像方式。通过实验证明了该CCD成像系统符合信噪比和探测周期等指标要求。

1 静止轨道差分吸收光谱仪原理

星载差分吸收光谱仪是一种以较高准确性测量经过地球大气或表面反射、散射的太阳光辐射的仪器。其光学原理如图1所示,地面观测区域目标的散射、反射光通过前置光学系统成像在狭缝平面,狭缝作为光阑使地面条带的像通过;光线经过汇聚镜照射到色散元件上,产生垂直于狭缝方向的光谱分布,投射在面阵探测器上。探测器将光信号转换成图像灰度数据,每帧图像数据对应一个地面条带的光谱数据。其获取的光谱数据通过光谱定标、辐射定标等处理后,生成辐亮度数据即可用于气体成分反演。通过对该数据采用DOAS算法,即可从窄带吸收谱线中反演出痕量气体如O₃、NO₂、HCHO和SO₂等浓度,以及从宽带散射特征线中获取如气溶胶的相关信息^[4]。

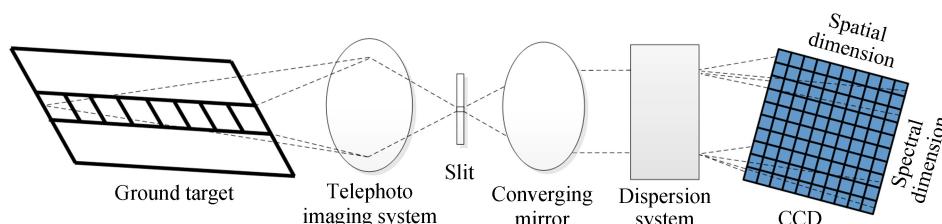


图1 差分吸收光谱仪光学原理图

Fig.1 Optical schematic of differential absorption spectrometer

光谱仪搭载于近地轨道卫星时,其相对地面存在相对运动,通过推扫方式即可获得二维地理图像和光谱维的信息,组成光谱数据立方体。其以固定帧速率获取光谱图像,无法通过增加积分时间来获取更高的信噪比。同时其重访周期相对较长(至少一天),无法做到小时级别的重访周期。当光谱仪搭载于静止轨道三轴式稳定卫星平台时,视轴对地面保持相对静止,因此可以通过“凝视”目标来提高光信号量以获取更高信噪比。利用摆镜来定位成像条带,通过摆镜的转动达到类似于低轨推扫成像的效果。其沿扫描方向的空间分辨率正比于摆镜的步进角;最短重访时间由从一个方向完成一次扫描成像所需时间决定,具有小时级别的重复观测能力。因此,静止轨道光谱仪相比于低轨光谱仪,可以获取更高的时间分辨率、空间分辨率以及信噪比,对于更准确地反演大气污染物气体含量以及分析大气成分的光化学过程十分重要,这些定量分析是建立大气成分监测和预报系统准确模型的前提。

采用“扫描摆镜+望远镜系统+色散系统+面阵探测器”的静止轨道差分吸收光谱仪光学系统如图 2 所示。前置望远系统通过摆镜的转动来获取不同地理位置的光信息,经过离轴三反镜会聚后,由分色片将 300~400 nm、395~500 nm 的光分别聚进入各自通道入射狭缝处,在成像光谱仪内进行色散后成像到相应面阵探测器上,从而获取光谱图像数据。仪器采用自东向西扫描的方式实现视场范围内空间二维和光谱一维共三个维度上的观测,即光谱仪像平面上的面阵图像探测器的行方向提供南北方向的空间分辨率,而光谱分辨率将沿着面阵图像探测器的列方向提供;东西方向的空间分辨率由摆镜对地面的一维扫描实现,如图 3 所示。

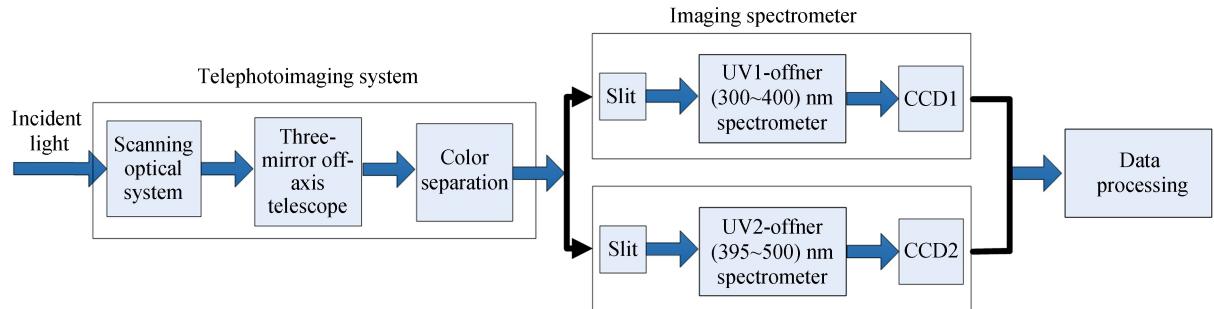


图 2 静止轨道差分吸收光谱仪的光学系统示意图
Fig.2 Imaging system structure of geostationary satellite-borne DOAS spectrometer

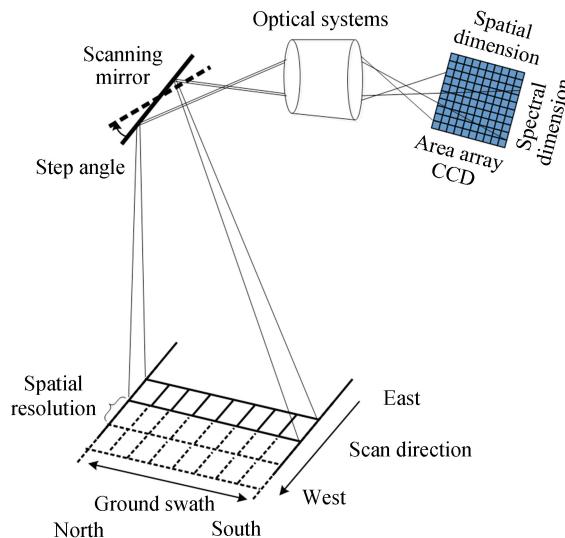


图 3 摆扫式成像工作示意图
Fig.3 Operation diagram of whisk-broom imaging

2 CCD 成像系统电路方案

2.1 面阵探测器选型

获取高质量的光谱图像数据对于发挥静止轨道差分吸收光谱仪的优势至关重要,首先需要优选图像探测器。设计中选用 E2V 公司的紫外增强背照帧转移型探测器 CCD47-20 作为该光谱仪两个通道的探测器,其

主要性能参数如表 1 所示,该芯片目前供货渠道正常,选型时首先需考虑 CCD 的量子效率,该型号 CCD 在探测波段(300~500 nm)具有大于 50% 的量子效率。作为成像光谱仪,每次对地拍摄获取的是按光谱展开的地面条带图像,其空间分辨率要求低,但是获取精度要求高。因此要求探测器具有高大势阱、低读出噪声和暗电流噪声。该 CCD 势阱高达 $100 \text{ ke}^-/\text{pixel}$,具有低速低噪声读出端口,同时芯片自带真空封装的半导体制冷器可以有效降低暗电流。

表 1 紫外增强型 CCD47-20 主要性能参数

Table 1 Main parameters of CCD47-20

Parameters	Value
Pixel size	$13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$
Active pixels ($H \times V$)	1024×1024
Quantum efficiency at 300~500 nm	>50%
Maximum readout frequency	5 MHz
Output responsivity	$4.5 \mu\text{V/e}^-$
Peak charge storage	$100 \text{ ke}^-/\text{pixel}$
Dark signal at -25°C	<100 $\text{e}^-/\text{pixel/s}$
Readout noise at -25°C at 1 MHz(RMS)	<6 e^-

2.2 CCD 成像系统电路结构

该静止轨道差分吸收光谱仪成像电路设计继承了低轨星载差分光谱仪的成像电路方案^[16]。以现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)作为 CCD 成像电路的核心控制器件,编写 Verilog 代码完成控制逻辑,并搭建外围电路实现对 CCD 的驱动、信号的采集和数据的传输。CCD 成像电路原理如图 4 所示,由时序生成电路、CCD 驱动电路、偏压电源电路、信号获取电路、数据转换电路以及数传电路组成。偏压电源电路产生 CCD 工作所需的偏置电压;信息获取电路由信号放大、滤波和模数转换器等组成,完成 CCD 输出信号的调理和模数变换;信息处理及数传控制电路基本集成于 FPGA 内,主要由 CCD 时序发生器,数据缓存器、格式编排模块、辅助数据接口以及低电压差分信号(Low Voltage Differential Signaling, LVDS)接口组成,完成 CCD 数字信号的缓存、合并及打包输出,辅助数据的更新工作。

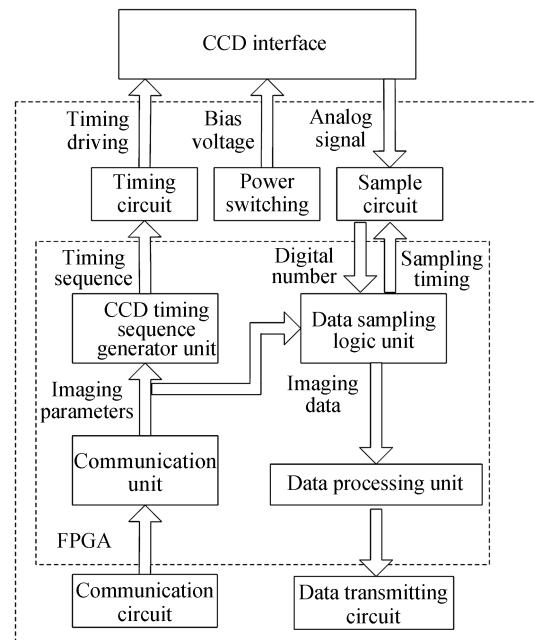


图 4 CCD47-20 成像电路系统
Fig.4 Imaging circuit system of CCD47-20

3 静止轨道光谱仪 CCD 成像方式设计

3.1 提升信噪比方式及影响

对于该光谱仪系统,探测器噪声 N_e 是其主要噪声来源,主要包括散粒噪声 σ_{shot} 、暗电流噪声 σ_{dark} 、读出

噪声 σ_{read} , 这些噪声均为随机噪声且相互独立. 散粒噪声与入射光子数的随机变化相关, 暗电流噪声与暗电流电子数的随机变化相关, S_e 为信号电子数.

$$\sigma_{\text{shot}} = \sqrt{S_e} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{dark}} = \sqrt{n_{\text{dark}}} \quad (2)$$

$$N_e = \sqrt{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{read}}^2} = \sqrt{S_e + n_{\text{dark}} + \sigma_{\text{read}}^2} \quad (3)$$

信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)为信号电子数与噪声电子数之比, 即

$$\text{SNR} = S_e / N_e = S_e / \sqrt{S_e + n_{\text{dark}} + \sigma_{\text{read}}^2} \quad (4)$$

由式(4)可看出, 减少暗电流和读出噪声以及增加信号电荷数可以提高信噪比. 光谱仪工作时, 利用CCD47-20自带的制冷器对CCD制冷到-25℃可以抑制暗电流至100 e-/pixel/s. 2 MHz读出速率时读出噪声约为8 e-, 远低于信号电荷量, 可以忽略. 增加信号电荷数可通过增加积分时间实现, 但受像元满阱容量的限制, 像元电荷不可无限增加, 发生饱和时电荷将溢出到相邻势阱. 光谱仪工作时应调节积分时间保证获取足够的信号电荷量但又不至于像元饱和. 为了避免像元饱和的同时继续提高信噪比, 可采用CCD像元合并、多帧叠加的方法, 相当于增加了像元的电荷数. 采用M像元合并, N帧叠加, 若每个像元的平均电荷数 n_{pixel} , 则总信号电荷为

$$S_e = M \times N \times n_{\text{pixel}} \quad (5)$$

忽略暗电流和读出噪声的影响, 可得

$$\text{SNR} = \sqrt{M \times N \times n_{\text{pixel}}} \quad (6)$$

本项目订购的探测器CCD47-20输出行的势阱深度为正常像元势阱深度的4倍, 可实现4像元模拟合并(4-Binning), 此时空间维分辨率值也将变为原先4倍.

3.2 成像方式分析与设计

该光谱仪在轨工作时, 每一次成像是对南北向的条带进行分光成像, 再通过自东向西扫描的方式实现对区域范围内的成像. 因此光谱仪对地观测的完成需要摆镜和CCD的配合, 考虑: 方案1, 摆镜恒速旋转的同时, 成像电路进行连续帧图像采集; 方案2, 摆镜每次转动一个步距角, 到位稳定后触发成像电路采集当前指向条带的光谱图像数据; 方案3, 成像电路进行连续帧图像采集, 在每个位置的最后一帧读出时段内, 摆镜转动一个步距角.

若采用方案1, 成像时观测条带由东向西漂移, 扫描方向上空间分辨率不易保证. 同时由于光谱仪不同工作模式下的重访时间和空间分辨率要求不等, 摆镜的转速需要调节, 不利于简化设计. 方案2和方案3均为对地面目标进行凝视成像、步进式扫描, 如图5所示. 主要区别在于触发方式的不同, 方案2采用摆镜转动完成信号触发CCD成像. 当摆镜的转动不稳定, 如转动时间偏差较大或易抖动时, 此方案较为适用. 方案3采用CCD曝光完成信号触发摆镜转动, 当摆镜转动一个步距角的时间确定时该方案较为适用. 其利用最后一帧读出的时间让摆镜转动, 节约了时间. 对该光谱仪的摆镜系统经过大量测试发现, 转动一个扫描步距角(14.4")并趋于稳定的时间约为200 ms, 小于读出时间250 ms, 因此可采用方案3. 具体时序为在对地面的每个位置进行成像时, 首先将CCD成像区的残余电荷进行清除, 接着开始电荷积分, 积分时间到达后将该帧电荷转移到存储区, 读出图像数据, 同时进行下一帧的电荷积分. 当完成设定帧数的图像曝光后, 向主控器发送“曝光完成”信号, 主控器此时发送控制命令到摆镜控制电路, 驱动摆镜步进到下一个成像位置, 等待上一个位置的最后一帧图像数据读出完成后继续进行上述操作. 当一次完整周期的成像结束后, 摆镜返回起始点, 成像电路等待下一次成像指令的到来.

电荷倾泻和帧转移所需时间短, 可以忽略, 方案2和方案3完成一次扫描成像的时间分别为

$$T_2 = n \times (m \times T_{\text{int}} + T_{\text{read}} + T_{\text{step}}) + T_{\text{back}} \quad (7)$$

$$T_3 = n \times (m \times T_{\text{int}} + T_{\text{read}}) + T_{\text{back}} \quad (8)$$

式中, T_{int} 表示单幅积分时间, 结合观测时段太阳天顶角和地表反射率等参数得到入瞳处辐射亮度范围、光谱仪光学参数以及CCD像元参数计算所需积分时间, 该光谱仪CCD积分时间取0.25~1 s之间; T_{read} 表示单幅读出时间, 为0.25 s; T_{step} 表示摆镜步进并稳定所需时间, 约为200 ms; T_{back} 表示摆镜回退到原始位置所需时间, 约为15 s; m 表示帧叠加数; n 表示总成像位置数. 根据扫描步长28.8"(对应地面40°N处5 km)、东西

方向成像范围 3.2° (地面 40°N 处 $2\,000\text{ km}$), 计算出 $n=400$.

可看出方案 3 比方案 2 节约用时 $n \times T_{\text{step}}$, 为 80 s , 对于高速观测模式下要求 10 min 实现周期扫描来说影响极大, 因此本设计中采用方案 3 作为 CCD 的成像模式.

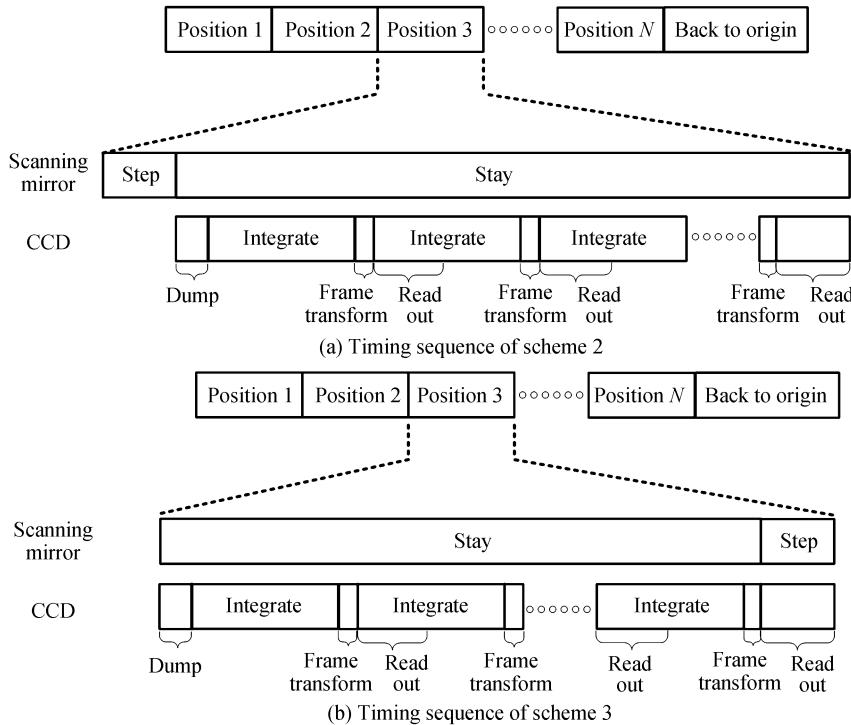


图 5 摆扫成像时序图

Fig.5 Schematic of timing sequence for scanning imaging

3.3 参数设置及效果

以 CCD 像元达到 80% 满阱为条件计算不同参数下的理论信噪比, 此时单像元电荷数 $n_{\text{pixel}} = 80\text{ke}^-/\text{pixel}$. 根据式(6), 为了达到信噪比大于 $1\,000$ 的要求, 可取 $M \times N = 16$, 即帧叠加数和像元合并数的乘积为 16. 在高分辨率观测模式下, 设置空间维像元 2-Binning, 达到 5 km 南北向空间分辨率, 则帧叠加数应为 8, 即每个位置拍摄 8 幅图像进行帧叠加. 在高速观测模式下, 通过空间维像元 4-Binning 达到 10 km 南北向空间分辨率; 则帧叠加数应为 4, 此时东西向空间分辨率为 20 km .

以最长单幅积分时间 1 s , 根据式(8)计算出高分辨率模式下一次完整观测时间为 3315 s , 优于 1 h 的指标要求; 高速模式下一次完整观测时间为 515 s , 优于 10 min 的指标要求. 最终实现效果如表 2 所示, 该设计方案可以满足系统指标要求.

表 2 高速和高分辨率观测模式效果

Table 2 Parameters of high-speed and high-resolution observation mode

Detection mode	High speed mode	High resolution mode
Average signal to noise ratio	1 131	1 131
Spatial resolution at 40°N (N/S×E/W)	$10\text{ km} \times 20\text{ km}$	$5\text{ km} \times 5\text{ km}$
Detection cycle time (maximum)	515 s	3 315 s

4 实验结果及分析

4.1 成像性能测试实验

光谱仪工作期间一般通过调节积分时间来将背景光调节到使得 CCD 像元达到 $50\% \sim 100\%$ 饱和之间, 验收测试采用 80% 饱和时的信噪比作为 CCD 成像系统验收数据. 对于整台光谱仪来说, 光谱维各个谱段区域光强差别较大, 各个谱段信噪比也不相同(CCD 成像系统信噪比与光强有直接关系). 同时实际观测时由于干扰因素较多, 无法准确测试信噪比.

使用积分球作为光源产生均匀光,对该 CCD 成像系统进行系统噪声测试。打开制冷器,将 CCD 制冷至 -25°C 以降低暗电流。调节积分球光线强度,使 CCD 在 0.5 s 积分时间下平均输出值为饱和时的 80% 左右,连续拍照 1 000 幅。 m, n, i 分别表示像元所在行数、列数以及当前图像序号。 $S_{i[m][n]}$ 、 $\text{DN}_{i[m][n]}$ 、 $\text{DN}_{\text{dark-}i[m][n]}$ 分别表示第 i 幅图像的 m 行 n 列像元信号值、输出灰度值、暗电流值,其中像元的暗电流值通过将该行 32 个暗像元输出值取平均获得; $\overline{S_{[m][n]}}$ 表示 m 行 n 列像元的信号均值。

$$S_{i[m][n]} = \text{DN}_{i[m][n]} - \text{DN}_{\text{dark-}i[m][n]} \quad (9)$$

$$\overline{S_{[m][n]}} = \sum_{i=1}^{1000} S_{i[m][n]} / 1000 \quad (10)$$

则噪声和信噪比分别为

$$N_{[m][n]} = \sqrt{\sum_{i=1}^{1000} (S_{i[m][n]} - \overline{S_{[m][n]}})^2 / 1000} \quad (11)$$

$$\text{SNR}_{[m][n]} = \overline{S_{[m][n]}} / N_{[m][n]} \quad (12)$$

随机取 1 000 个像元的,计算出其平均信噪比为 278.6。该信噪比为无 Binning、无帧叠加时的结果。根据 3.1 节的分析,当采用帧叠加和像元合并时,信噪比得到提升。采用高分辨率模式(2 像元合并以及 8 帧叠加)进行图像采集,此时每一幅图像都是 8 次拍照叠加的图像,每个像元都是原先空间维方向 2 个像元的叠加。经计算得,此时信噪比为 1 097.3,同理计算出高速模式下信噪比为 1 124.7,均满足 $\text{SNR} > 1 000$ 的要求。

4.2 污染物观测实验

为了验证该系统获取区域范围内光谱图像的可行性,将该 CCD 成像系统应用于一套地基单通道差分吸收光谱仪实验系统,对某电厂烟囱处烟羽进行摆扫观测,如图 6。仪器的视场角为 30° ,测量时整体仰角约为 15° ,因此仪器现场对应的仰角为 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。每次摆镜水平转动角度为 0.05° ,对应扫描方向空间分辨率为 0.1° ,从右向左依次水平扫描 400 步,积分时间 0.25 s。通过高分辨率观测模式(空间维像元 2-Binning、8 帧叠加)获取目标区域的光谱图像数据,未出现漏成像、重复成像等现象。说明 CCD 成像系统能配合摆镜工作,正确获取区域范围内光谱图像。



图 6 污染物观测实验现场图

Fig.6 Photo of pollutant observation experiment

数据经过暗背景扣除、光谱定标校正、辐射定标校正、几何定标校正等处理,得到一级辐亮度数据产品。主要观测污染物为 SO_2 ,其在 $305 \sim 330 \text{ nm}$ 波段吸收强度高。选择天顶观测光谱为参考谱,利用 DOAS 算法进行数据拟合反演,计算观测区域 SO_2 气体柱浓度分布。图 7 为烟羽中心一条测量谱的拟合实例,采用三阶拟合,得到该处 SO_2 斜柱浓度(Slant Column Density, SCD)为 $9.34 \times 10^{16} \text{ molecules/cm}^2$ 。将获得的 SCD 数据进行二维拼图,得到观测区域 SO_2 斜柱浓度二维分布如图 8, x 轴代表光谱仪水平扫描角度, y 轴代表光谱仪垂直视场角度,图像代表探测区域各个点对应的 SO_2 积分柱浓度。

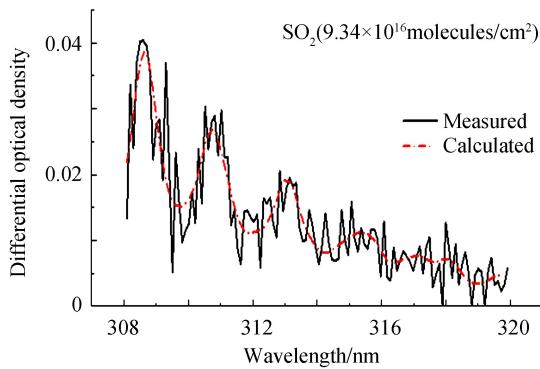
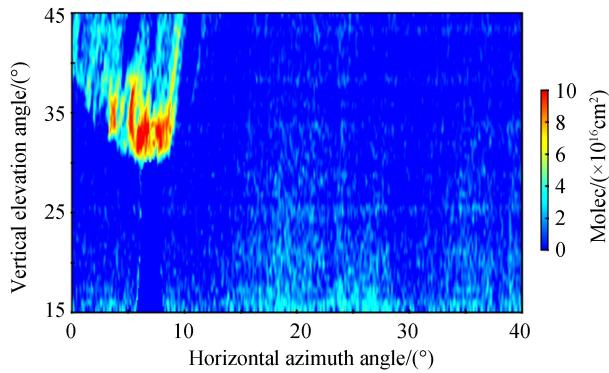


图 7 DOAS 拟合反演实例

Fig.7 Fitting result of DOAS retrieval

图 8 观测区域 SO₂ 斜柱浓度二维分布Fig.8 Two-dimensional distribution of SO₂ slant column intensity

5 结论

本文从搭载于静止轨道卫星的差分吸收光谱仪对地探测需求出发,完成了其 CCD 成像系统设计。分析得出增加积分时间、通过帧叠加和像元合并可以提高信噪比,并通过合理的参数设置,达到了信噪比、空间分辨率要求。针对该光谱仪摆扫成像的特点,设计了每个位置最后一帧读出时进行摆镜转动的方案。该方案具有通用性好、成像周期短的特点。1 s 曝光时间条件下,高速模式探测周期为 515 s,高分辨率模式下探测周期为 3 315 s,满足重访周期要求。对该 CCD 成像系统的测试表明,高分辨和高速率模式下图像信噪比分别为 1 097.3 和 1 124.7,均大于 1 000。将该 CCD 成像系统应用于地基差分吸收光谱仪实验系统时,能正确获取用于污染物反演的光谱图像。该 CCD 成像系统满足静止轨道星载差分吸收光谱仪对地探测需求,已通过预研阶段评审,可为载荷应用提供参考。

参考文献

- [1] WANG Qiao, LIU Si-han. Research and implementation of national environmental remote sensing monitoring system[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, **20**(5): 1161-1169.
王桥, 刘思含. 国家环境遥感监测体系研究与实现[J]. 遥感学报, 2016, **20**(5): 1161-1169.
- [2] ZHANG Xiu-ying, ZHANG Wu-ting, LU Xue-he, et al. Long-term trends in NO₂ columns related to economic developments and air quality policies from 1997 to 2016 in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **639**: 146-155.
- [3] DEBRA E K, ANNE M T, MIROSLAV J, et al. OMI satellite and ground-based pandora observations and their application to surface NO₂ estimations at terrestrial and marine sites[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2018, **123**(2): 1441-1459.
- [4] SI Fu-qi, JIANG Yu, JIANG Qing-wu, et al. Design of fore optical system in space-borne differential optical absorption spectrometer for atmospheric trace gas monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(3): 237-243.
司福祺, 江宇, 江庆五, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统设计[J]. 光学学报 2013, **33**(3): 237-243.
- [5] ZHAO Min-jie, SI Fu-qi, LU Yi-huai, et al. Spectral image correction method for space-born differential optical absorption spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(12): 295-301.
赵敏杰, 司福祺, 陆亦怀, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱图像校正方法研究[J]. 光学学报, 2015, **35**(12): 295-301.
- [6] CHEN Xi, CAI Zhao-nan, LIU Yi, et al. Monitoring air pollution in China from geostationary satellite: a synthetic study using simulated observations. [J]. *Scientia Sinica Terra*, 2018, **48**(10): 1352-1362.
陈曦, 蔡兆男, 刘毅, 等. 基于静止轨道卫星监测中国大气污染物的模拟分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, **48**(10): 1352-1362.
- [7] ZOOGMAN P, LIU X, SULEIMAN R M, et al. Tropospheric emissions: monitoring of pollution (TEMPO)[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, **186**: 17-39.
- [8] NICKS D, BAKER B, LASNIK J, et al. Hyperspectral remote sensing of air pollution from geosynchronous orbit with GEMS and TEMPO[C]. *Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization V*. International Society for Optics and Photonics, 2018, 10781: 107810T.
- [9] GULDE S T, KOLM M G, SMITH D J, et al. Sentinel 4: a geostationary imaging UVN spectrometer for air quality monitoring: status of design, performance and development[C]. *International Conference on Space Optics—ICSO 2014*. International Society for Optics and Photonics, 2017, 10563: 1056341.

- [10] ZHANG Yu-heng, WEI Ming-zhi, SONG Qian, et al. Development of an astronomical modularized CCD universal controller[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(11): 1112003.
张玉衡, 魏名智, 宋谦, 等. 模块化天文 CCD 通用控制器[J]. 光子学报, 2016, **45**(11): 1112003.
- [11] PAN Ming-zhong, LIU Yu-juan, CHEN Shao-jie, et al. Design of echelle spectrograph CCD camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(8): 1725-1731.
潘明忠, 刘玉娟, 陈少杰, 等. 中阶梯光栅光谱仪 CCD 相机的设计[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(8): 1725-1731.
- [12] QIU Xiao-han, WANG Yu, CHANG Zhen, et al. Design and implementation of CCD imaging circuit for airborne ultraviolet DOAS imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(5): 222-229.
邱晓晗, 王煜, 常振, 等. 机载紫外 DOAS 成像光谱仪 CCD 成像电路的设计及实施. 红外与激光工程, 2017, **46**(5): 222-229.
- [13] MA Qing-jun, SONG Ke-fei, QU Yi, et al. Design of CCD circuit systems for ultraviolet limb imaging spectrometers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1538-1545.
马庆军, 宋克非, 曲艺, 等. 紫外临边成像光谱仪 CCD 电路系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(7): 1538-1545.
- [14] LIANG Shao-lin, WANG Yong-mei, JIA Nan, et al. Design and implementation of CCD imaging system for aerosol detector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, **45**(11): 252-259.
梁少林, 王咏梅, 贾楠, 等. 气溶胶探测仪 CCD 成像系统的设计[J]. 中国激光, 2018, **45**(11): 252-259.
- [15] CHANG Zhen, WANG Yu, SI Fu-qing, et al. Design and implementation of ultraviolet imaging system based on scientific grade CCD[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(8): 0804002.
常振, 王煜, 司福祺, 等. 基于科学级 CCD 的紫外成像系统设计与实现[J]. 中国激光, 2017, **44**(8): 0804002.
- [16] WANG Yu, LU Yi-huai, ZHAO Xin, et al. Design and implementation of CCD imaging circuit for satellite - borne DOAS spectrometer[J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(6): 663-668.
王煜, 陆亦怀, 赵欣, 司福祺. 星载差分吸收光谱仪 CCD 成像电路的设计及实施[J]. 激光与红外, 2015, **45**(6): 663-668.