

## 机载紫外 DOAS 成像光谱仪 CCD 成像电路的设计及实施

邱晓晗<sup>1,2</sup>, 王煜<sup>1</sup>, 常振<sup>1,2</sup>, 田禹泽<sup>2</sup>, 司福祺<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 机载紫外 DOAS 成像光谱仪通过获取大气与地表的折射或散射的紫外光辐射, 监测大气痕量气体的分布与变化, 其电子学部件的重要组成部分为 CCD 成像电路。采用帧转移型面阵 CCD-47-20 为图像传感器, 以现场可编程门阵列(FPGA)为核心控制器的成像电路模块, 设计并实现了一套完整的机载紫外光谱仪成像系统。CCD 成像电路完成包括 CCD 驱动时序电路、CCD 数据采集电路, 接收 CCD 模拟图像信号产生数字图像信号, 将数字图像信号通过差分芯片驱动以低压差分信号(LVDS)传输给机载通讯系统等功能。讨论了机载紫外成像光谱仪的设计过程, 并重点讨论了 CCD 成像电路的设计过程。设计的机载紫外 DOAS 成像光谱仪系统成像分辨率为 0.286°。实验证明满足大气污染气体的观测需求。

**关键词:** 成像光谱仪; 帧转移面阵 CCD; 成像电路

**中图分类号:** TP73   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0538002

## Design and implementation of CCD imaging circuit for airborne ultraviolet DOAS imaging spectrometer

Qiu Xiaohan<sup>1,2</sup>, Wang Yu<sup>1</sup>, Chang Zhen<sup>1,2</sup>, Tian Yuze<sup>2</sup>, Si Fuqi<sup>1</sup>

- (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)

**Abstract:** Airborne ultraviolet imaging DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) spectrometer monitors the distribution and changes of atmospheric trace gases by obtaining the UV radiation of atmosphere and surface reflection or scattering. In this spectrometer, the CCD imaging circuit is the core of electronic device. A complete system was designed and implemented by using frame transfer area array CCD-47-20. Field-Programmable Gate Array (FPGA) was adopted as the core controller of the CCD imaging circuit, which generated CCD driving sequences, CCD data acquisition, received and converted CCD analog imaging signal to digital signal. CCD digital imaging signal was drove by differential line driver and then acquired by the airborne communication system in low voltage differential signaling (LVDS) format. The design and implementation of the circuit was described, and the design process of the CCD imaging circuit was mainly discussed. The imaging resolution of airborne ultraviolet

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(41275037); 安徽省杰出青年科学基金(1308085JGD03);  
安徽省自然科学基金(1408085MKL49)

作者简介: 邱晓晗(1987-), 男, 博士生, 主要从事成像电路方面的研究。Email: xhqu@aoifm.ac.cn

导师简介: 王煜(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事航空航天遥感设备方面的研究。Email: yuwang@aoifm.ac.cn

imaging DOAS spectrometer monitoring is  $0.286^\circ$ . The experiments show that the requirements of polluting gases observation can be satisfied.

**Key words:** imaging spectrometer; frame transfer area array CCD; imaging circuit

## 0 引言

环境保护是遥感技术最重要的应用之一，机载是遥感技术从地基到星载的必经阶段。随着环境污染的日益严重，各个拥有机载遥感技术的国家都将环境保护作为其应用和研究的重点。机载遥感技术在污染监测方面省时、省力，具有其他遥感技术所不具备的优势，研究机载遥感技术具有重大的意义<sup>[1-5]</sup>。

目前，国内现有的紫外 DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) 成像光谱仪设备大多采用进口的成品 CCD 相机，而使用国外成品 CCD 相机无法与本项目中的飞机平台顺利对接，因为成品相机多使用 USB 接口或 CameraLink 接口，而飞机平台需要 RS485 接口和 LVDS (Low Voltage Differential Signaling) 接口，所以设计的紫外 DOAS 光谱仪是光机电全部自主设计的产品。该光谱仪监测区域内对气候和生态环境有重要影响的痕量气体 ( $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $HCHO$ 、 $BrO$ 、 $OCLO$  和  $SO_2$ ) 的分布和变化，定量获得区域上空空气质量变化，以及污染气体和气溶胶的分布输运过程，监测工业排放和生物燃烧对大气组成成分的影响，并最终服务于建立区域大气成分监测与预警技术体系<sup>[2-4]</sup>。

## 1 机载紫外光谱仪的整体设计

机载紫外光谱仪通过探测大气与地表反射的紫外光辐射来分析大气痕量污染气体的宏观分布与变化<sup>[2-4]</sup>。光谱仪的光谱范围为 200~500 nm，光谱分辨率达到 0.3~0.5 nm，采用推扫方式，形成  $40^\circ$  视场角。综合考虑机载光谱仪分辨率设计指标高等总体要求，光谱仪利用光谱分割的设计对 200~500 nm 光谱范围进行了分割，分为 200~276、270~380 和 380~500 nm 3 个通道。划分为 3 个通道后，光谱范围窄，大幅减小了透镜设计中色差校正难度，也减小了凸面光栅设计难度，保证了光学设计的可实现性。因此系统划分为 3 个通道，每个通道都设计有望远透镜、光栅、反射镜等光学组件，且每个通道都有 1 个

CCD 探测器接收。在后续数据处理中，3 个通道的光谱数据通过精确的光谱定标、辐射定标等预处理后，拼接为 200~500 nm 的连续一级辐亮度数据产品，光谱维像元数总计 3 072 个，用于进一步的痕量气体等产品反演。

当对地观测时，地面目标的光线首先进入前置紫外物镜，将太阳光汇聚成像到入射狭缝后进入基于凸面光栅的 Offner 成像光谱仪<sup>[4,6]</sup>，再经过反射镜和光栅，成像到面阵 CCD 探测器<sup>[7]</sup>。此时面阵 CCD 探测器将获得狭缝中全部光谱，完成光谱维和空间维的光谱采集。即地面目标被 CCD 采样成 1 024 个空间点，每个点的光谱被光栅再分光为 3 072 (1024×3) 个波段成像到面阵 CCD 探测器上。在后续数据处理中，3 个通道的光谱数据通过精确的光谱定标、辐射定标等预处理后，拼接为 200~500 nm 的连续一级辐亮度数据产品，光谱维像元数总计 3 072 个，用于进一步地痕量气体等产品反演。

机载成像光谱仪的成像方式如图 1 所示，光谱仪的狭缝通过望远镜对地投影成 1 个条状目标，其投射方向对应探测器的空间维，当飞机飞行时，狭缝对地面进行推扫，获取投影目标的光谱信息，形成包含光谱信息和地理信息的光谱图像。其中，光谱维为 CCD 沿行方向，空间维为 CCD 沿列方向<sup>[3]</sup>。

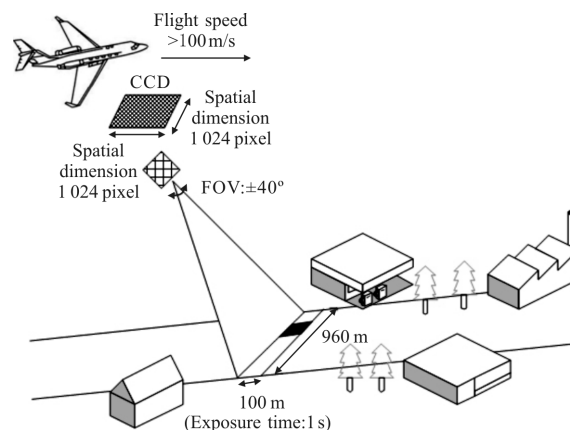


图 1 机载紫外成像光谱仪对地观测方式

Fig.1 Way of airborne ultraviolet imaging spectrometer earth observation

由此可以看出 CCD 探测器是紫外成像光谱仪最重要的组成部分之一, CCD 探测器以及 CCD 成像电路的性能几乎决定了紫外成像光谱仪的成像质量。

在 CCD 探测器的选型上, 由于紫外成像光谱仪为光谱测量设备, 所以不需要太高的成像分辨率, 但是需要高精度的 CCD, 且要求饱和光强 80% 时的信噪比达到 270<sup>[3]</sup>。考虑到散弹噪声为 CCD 成像过程中的主要噪声, 成像系统的信噪比可由公式  $R_{SN} = N/N_{shot}$  和  $N_{shot} = \sqrt{N}$  (其中  $N$  为满阱电荷数,  $N_{shot}$  为散弹噪声电子数) 算出。因此满阱电荷数  $N$  至少为 91 125 e-/pixel。为此选用 E2V 公司生产的帧转移面阵 CCD-47-20, 该 CCD 包含 1 024×1 024 有效像素, 像元尺寸为 13 μm, 满阱电荷数为 100 Ke-/pixel, 光谱范围为 200~1 100 nm<sup>[8]</sup>。满足光谱仪的慢速、高精度成像的要求, 同时满足 200~500 nm 的光谱范围要求。

当飞机飞行时, 由于巡航高度的不同, 需要调整不同的曝光时间。曝光时间对应着地面分辨率, 所以需要根据不同照度和不同精度要求, 通过牺牲地面分辨率来获得更大的曝光量。增加曝光量是为了获取更高的精度, 因为曝光时间增加, 量子效率就会增加, 而精度是由量子效率决定的。因此提供四档曝光时间, 分别为 0.5、1、2、4 s。

机载控制平台通过 RS-485 总线向紫外光谱仪 CCD 成像电路的前端发送指令, 如曝光时间和放大倍数等参数, 并给出地理位置和时间信息用于定标。紫

外光谱仪成像数据通过 CCD 成像电路的 LVDS 接口连接机载控制平台, 紫外光谱仪的光学部件将光束在光谱方向上分为 3 路, 通过 3 组 CCD 成像电路转换为 3 路数据, 通过 LVDS 传输到机载大容量存储器。表 1 列出了 CCD 成像电路设计的技术要求。

表 1 CCD 成像电路主要技术要求  
Tab.1 Main technical requirements of CCD imaging circuit

| No. | Design requirement             | Specifications  |
|-----|--------------------------------|---|
| 1   | CCD driving clock              | Providing independent 3 CCD driving clock and adjusting CCD exposure time (0.5-4 s).                |
| 2   | Digital-to-analogue conversion | Converts analogue image signals from CCD output to 16-bit digital signals                           |
| 3   | Image buffer                   | Store data and used for data encapsulation  |
| 4   | Command reception              | Receive control instruction, cruising altitude, cruising speed, etc. from airborne control platform |
| 5   | Communication function         | Packaging imaging time, exposure time, gain, etc. into LVDS data, and transmitting the LVDS data    |

## 2 CCD 成像电路设计

根据表 1 所示的技术要求, 该设计采用 FPGA 完成驱动时序功能、通讯功能, 模数转换等功能, 结构如图 2 所示。

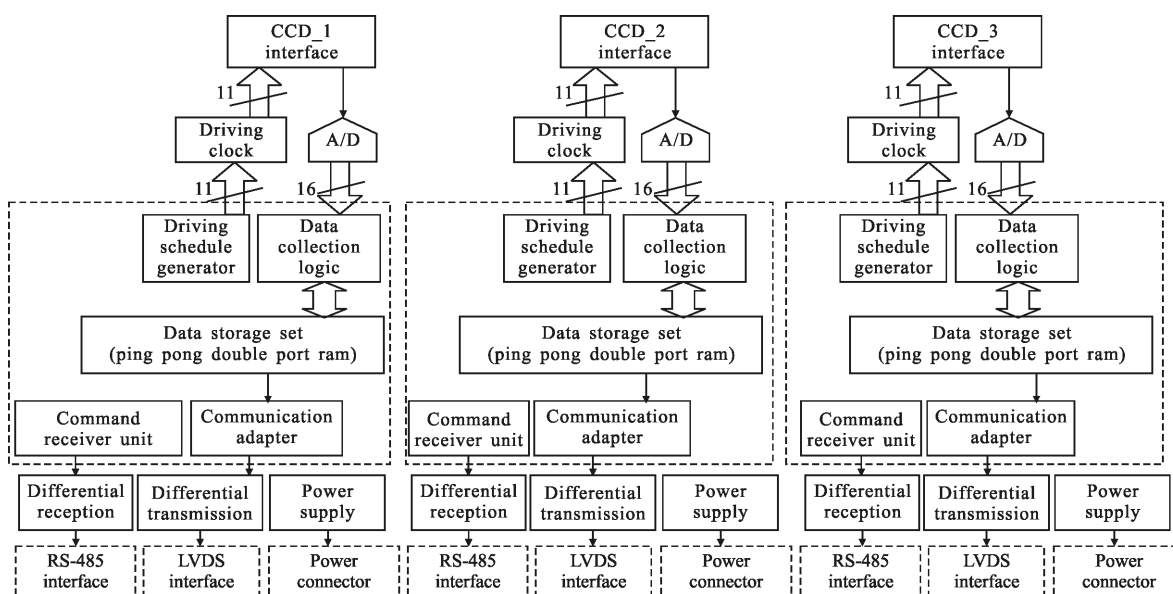


图 2 CCD 驱动电路整体框图

Fig.2 Diagram of CCD driving circuit

图 2 中每路 CCD 成像电路模块主要包括: FPGA 控制器、CCD 信号采集电路以及 CCD 通讯电路。CCD 成像电路用于提供 CCD-47-20 所需的工作电压和驱动时序。CCD 芯片安装在紫外光谱仪上,并将模拟图像信号回传给 CCD 成像电路。经过预处理后的模拟图像信号通过集成了相关双采样(CDS)和 A/D 转换的 CCD 模数转换电路产生数字图像信号。数字图像信号再由 FPGA 双口 RAM 乒乓缓存后,通过差分芯片驱动产生 LVDS 数字图像信号。LVDS 信号整合曝光时间、帧号、行号、本地时钟等信息后,通过机载控制平台存储到大容量存储器。

其中 FPGA 控制器承担了整个成像电路的时序逻辑控制功能和通讯功能。包括:CCD 驱动时序、CCD 模拟信号采集、CCD 控制命令、LVDS 数据传输等。

### 2.1 CCD-47-20 的结构与时序分析

CCD-47-20 是帧转移面阵 CCD,主要由曝光区域、存储区域和水平读出电路组成<sup>[8-9]</sup>。根据 CCD-47-20 结构与工作原理,其工作过程为:首先在帧转移时钟  $I\Phi$  的驱动下,曝光区每一行感光像元内的光生电荷将垂直转移到相邻的下一行像元中。如此循环,曝光区一帧图像便逐行转移到存储区。与此同时,存储区每一行的光生电荷在行转移时钟  $S\Phi$  的驱动下逐行垂直转移到水平读出区。最后,转移到水平读出区的每行光生电荷在水平读出时钟  $R\Phi$  的驱动下,水平转移到浮置扩散放大器,转换为电信号即模拟图像信号。

### 2.2 驱动时序设计与仿真

CCD 的驱动时序、数据采集时序以及通讯等功能由 FPGA 完成,FPGA 采用 Xilinx 公司生产的 Spartan3 系列的 XC3S400 芯片。采用外部晶振提供 36 MHz 时钟,36 MHz 时钟内部分频为 36、18、9 和 4.5 MHz,分别对应 0.5、1、2、4 s 的曝光时间以满足不同的曝光需求。36 MHz 时钟经过根据不同的曝光时间分频后提供给驱动时序电路,驱动时序电路根据 CCD 的驱动时序生产 10 路驱动信号,每个像元读出占用 16 个时钟节拍。驱动信号主要由帧转移时钟  $I\Phi 1$ 、 $I\Phi 2$ 、 $I\Phi 3$ ;行转移时钟  $S\Phi 1$ 、 $S\Phi 2$ 、 $S\Phi 3$ ;水平读出时钟  $R\Phi 1$ 、 $R\Phi 2$ 、 $R\Phi 3$ ;以及复位时钟  $\Phi RR$  组成。

根据 CCD-47-20 的驱动时序关系,驱动时序主要分为两个阶段。

#### (1) 帧转移阶段

帧转移阶段在帧转移时钟  $I\Phi$  和行转移时钟  $S\Phi$  共同作用下,将曝光区的电荷转移到存储区。通过 1 024 次逐行转移,整个曝光区的电荷被搬运到存储区,且曝光区被清空。

#### (2) 读出阶段

读出阶段将存储区的像元逐点转移到输出放大器。通过行转移时钟  $S\Phi$ ,将存储区电荷向水平读出寄存器(1024 元)搬运一行电荷(每行 1024 元)。然后通过水平转移时钟  $R\Phi$  将水平读出寄存器内的 1024 个像元的电荷逐点搬运到输出寄存器。逐点读出之后再搬运一行像元到水平读出寄存器,如此重复 1 024 次,将存储区的 1 兆像元全部读出(1 024 元×1 024 行)。

在存储区读出的同时,曝光区产生新的光生电荷,那么曝光时间即帧转移阶段和读出阶段的时间总和。由于帧转移时间通常很短,可以认为读出阶段的时间决定了曝光时间。图 3(a)为帧转移阶段时序仿真结果,图 3(b)为读出阶段时序仿真结果。

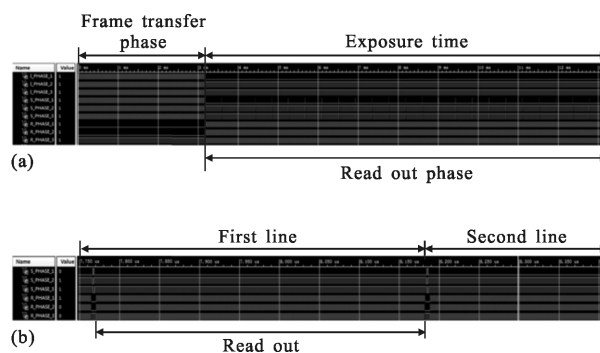


图 3 帧转移阶段时序仿真和读出阶段时序仿真

Fig.3 Frame transfer phase timing simulation and Read out phase timing simulation

以 0.5 s 曝光为例,图 3(a)显示了帧转移阶段和水平读出阶段以及曝光时间阶段;图 3(b)显示了水平读出阶段,存储区第一行和第二行的像元读出,仿真结果满足设计要求。

### 2.3 CCD 模拟信号采集

CCD 信号采集电路对提高成像系统的性噪比起着至关重要的作用。CCD 经过驱动信号驱动,产生模拟图像信号,经过放大、隔直、滤波后进入相关双采样(CDS)和 A/D 模数转换的 CCD 模数转换电路产生数字图像信号<sup>[10]</sup>。模拟图像信号的像元位置的无光生电荷时输出的电压,即参考电平;其光生电

荷信号位置的输出电压,即输出电平,该电平表示像元位置的光生电荷量。两处电平的差值即为该像元的曝光强度<sup>[10]</sup>。由此可知,相关双采样就是在 A/D 转换时依次采集各个像元的参考电平和输出电平,然后对其差值进行 A/D 转换,如此便得到该像元的曝光强度。

相关双采样(CDS)和 A/D 转换集成芯片采用的是 ADI 公司生产的 AD9826。该芯片是一款专门处理 CCD 模拟图像信号的处理器,由 1 个输入钳位、相关双采样保持器 CDS、可编程增益放大器(PGA)以及 16-bit 的 A/D 转换器等部分组成<sup>[6]</sup>。FPGA 根据 CCD 驱动时序,给 AD9826 提供 AD 时钟、相关双采样的前采样信号和后采样信号。其中前、后采样信号的差值即为图像信号。为了输出 16-bit 数据,AD9826 的 8-bit 输出管脚需要分时复用,即在一个 AD 时钟周期的前半周期和后半周期,分别输出高 8-bit 和低 8-bit 数据。输出数据传输到 FPGA 后再拼接为 16-bit 数据的图像数据。

## 2.4 CCD 控制命令

CCD 信号采集时机载控制平台会向 CCD 成像电路发送包括曝光时间、增益和偏置等控制命令。该命令是通过 RS-485 总线向 CCD 成像板的单片机发送控制命令,然后单片机并行转发给 FPGA。当曝光时间命令发送给 FPGA 后,FPGA 会根据命令改变 CCD 驱动时序。而增益与偏置则由 FPGA 内部 SPI 控制器发送给 AD9826 的 SPI 接口。其中增益是为了使得 CCD 信号在小信号时能和 AD 的动态范围相匹配,一般根据实际的光线亮度来调整。偏置是将 CCD 产生的模拟图像信号抬高一个电平,用以防止极小信号在数/模转换的过程中失真<sup>[12]</sup>。根据 CCD-470-20 的使用经验,一般设置为 30 mV。

## 2.5 LVDS 数据传输

成像电路使用两个大小为 2 kB 的 RAM 缓冲区构成乒乓缓存,16-bit 位的图像数据会顺序填入乒乓缓存,当一个缓冲区被填满后会继续填入另一个缓冲区,而机载控制平台发现一个缓冲区被填满后说明一帧图像数据被读出,此时会将图像数据和图像信息一起打包后通过 LVDS 串行总线发送并储存在机载大容量存储器中。一帧图像数据包包括图像数据和图像信息,其中图像信息包含帧头、同步头、包长度、包类型、设备标识、帧号、行号、成像时刻、周

内秒、百微妙、积分时间和增益等信息。

## 2.6 硬件电路设计实现

硬件电路包括:FPGA(XC3S400)、单片机(C8051)、相关双采样芯片(AD9826)、LVDS 发送器(DS90LV031)、RS-485 收发器(DS26LV32/DS26LV31)以及其他外围电路。外围接口包括:CCD 驱动接口、LVDS 输出接口、RS485 接口以及电源接口。电路采用四层印制电路板完成,装配在 1 mm 厚的铝合金机箱中。电路板及机箱外观如图 4 所示。

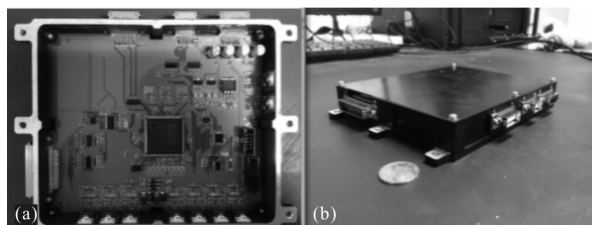


图 4 电路板及机箱外观图

Fig.4 Diagram of printed circuit board and case

为了给机载设备提供地面的调试与检测,实验室研发了地检平台。该平台由 LVDS 转 USB 适配器与上位机控制软件组成。CCD 成像电路产生的图像数据将通过 LVDS 接口传输给 LVDS 转 USB 适配器,该适配器将串行 LVDS 数据转换为 USB 数据后,再通过 USB2.0 接口发送给上位机,上位机控制软件将数据解码后,实时显示图像。控制命令则由上位机控制软件通过 USB2.0 接口发送给 LVDS 转 USB 适配器,再由适配器上的 RS-485 接口发送给 CCD 成像电路。

## 3 实验结果

### 3.1 实验方法

机载紫外光谱仪是利用成像差分吸收光谱技术,该技术是差分吸收光谱技术与成像技术的结合,采用面阵 CCD 同时记录目标的光谱信息和空间信息,通过机载成像的方式分别对电厂烟羽及城市边界层、区域痕量气体进行扫描测量,获取目标区域内痕量气体的二维分布图,为进一步分析痕量气体分布提供数据源<sup>[7]</sup>。

为了验证机载紫外 DOAS 成像光谱仪中的 CCD 成像电路的可行性,此次实验采用在地面利用水平转台转动推扫的方式来代替飞机向前飞行的推

扫方式获得三维数据。实验仪器主要由笔记本电脑、制冷系统、紫外光谱仪系统以及水平转台组成,其结构如图 5 所示。

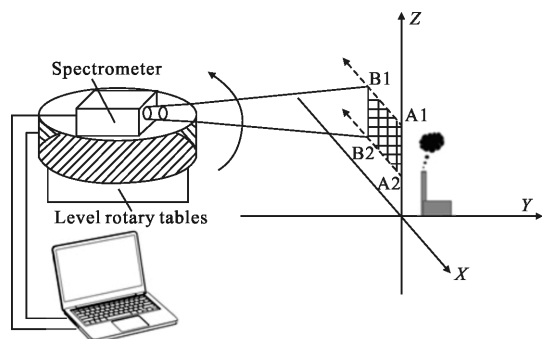


图 5 地基测量示意图

Fig.5 Diagram of ground-based measurement

面阵 CCD 包含 1 024 条光谱维和 1 024 条空间维,当光谱仪照射 A1-A2 时,便获得该位置上的 Z 轴方向上的 1 024 条具有 1 024 个像素的光谱,此时对每条光谱进行反演,即可得到对应区域的痕量气体信息<sup>[7]</sup>。随着转台由 A1-A2 到 B1-B2 的推扫,便可获得该区域痕量气体的二维分布情况。

该系统设计的光谱划分为 3 个光谱通道,3 个通道光谱仪原始数据分别进行暗背景扣除、光谱定标、辐射定标、几何定标等处理,拼接为 200~500 nm 的一级辐亮度数据产品,光谱维像元数总计 3 072 个。在实际应用中,针对不同痕量气体反演不同的特点,可以从该连续光谱中截取一段,用于进一步数据分析。分析过程中,单独的光谱强度,无法直接对应到污染气体的浓度,需要相应反演算法。

数据处理过程中,由于不同污染气体的特征吸收截面存在差异,不同气体的反演波段也不同,反演算法基于差分吸收光谱算法(DOAS),该算法通过数字滤波去除随波长做慢变化的宽带光谱结构,对剩余光谱中的快变化部分与气体分子的标准参考光谱进行非线性最小二乘法拟合,从而得到各种气体的斜柱密度。

### 3.2 实验结果

2016 年 4 月 8 日,采用在地面利用水平转台推扫的方式对合肥市某电厂开展了现场观测实验,测量现场照片如图 6 所示,观测通道为通道 3(对应波段为 380~500 nm)。测量地点距离发电厂烟囱约 1 185 m 处,当天天气晴好,风速较小。仪器的整体仰

角约为 15°,因此仪器现场对应的仰角为-5°~35°。水平扫描的步进角度为 0.123°。水平扫描 380 步,积分时间 0.5 s,采集观测目标区域的光谱信息,获取了目标区域的图谱信息。



图 6 现场测试照片

Fig.6 Photo of experimental site

为了初步判断观测过程中扫描角度、扫描区域选择是否合理,首先需要对观测区域的目标进行粗略成像。考虑到观测区域灰度图无特定应用目标和应用需求,因此仅选择某一个波长值 440 nm(非特定值,对应通道 3 的 380~550 nm,面阵 CCD 探测器光谱维第 512 列像元)进行绘制,如图 7(a)所示。从图 7(a)可以看出观测图像分辨率较高,能清晰地分辨地面目标。图 7(b)为烟羽附近的观测光谱数据。

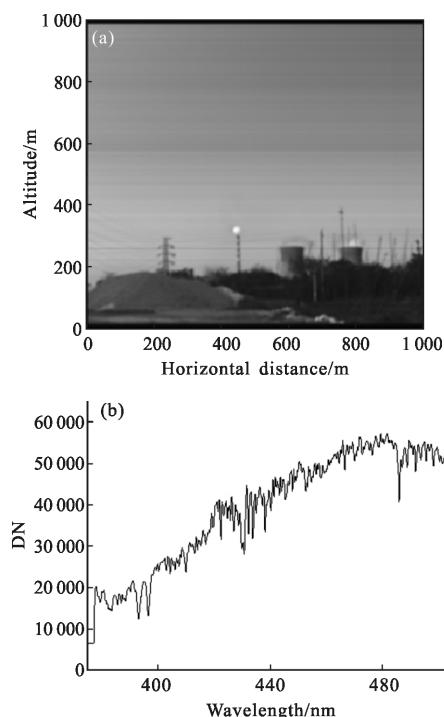


图 7 扫描观测目标 440 nm 波长位置图像信息

Fig.7 Image information of scanning the position of 440 nm wavelength

此次实验针对电厂附近的污染进行观测,此次观测仅以 NO<sub>2</sub> 为主要观测污染物,NO<sub>2</sub> 的反演波段为 425~422 nm 对应采集通道 3,该波段处 NO<sub>2</sub> 气体吸收强度高,同时 HCHO、O<sub>3</sub> 等气体干扰小,利于 NO<sub>2</sub> 气体吸收信息的提取,其余通道的观测数据可用于其他污染物的观测。根据 NO<sub>2</sub> 的反演特点,此次实验选择天顶观测光谱为参考谱,采集通道 3(380~500 nm)CCD 的光谱数据(反演波段为 425~422 nm 对应光谱维 384 列~529 列),采用 DOAS 算法计算观测区域 NO<sub>2</sub> 气体柱浓度分布,反演波段为 425~422 nm,参与拟合的气体包括 NO<sub>2</sub> 及 Ring 伪吸收截面。图 8 示意了 NO<sub>2</sub> 柱浓度反演实例,上部分为 NO<sub>2</sub> 气体标准差分吸收截面(细线)和拟合结果的叠加,下部分为反演的拟合残差。相应的 NO<sub>2</sub> 斜柱浓度为 4.07E16 molec./cm<sup>2</sup>,拟合残差为 1.61E-3。图 9 为观测区域 NO<sub>2</sub> 斜柱浓度分布,呈现出 NO<sub>2</sub> 在垂直与水平方向的二维区域分布,可观察到 NO<sub>2</sub> 斜柱浓度高值主要集中在烟囱附近。

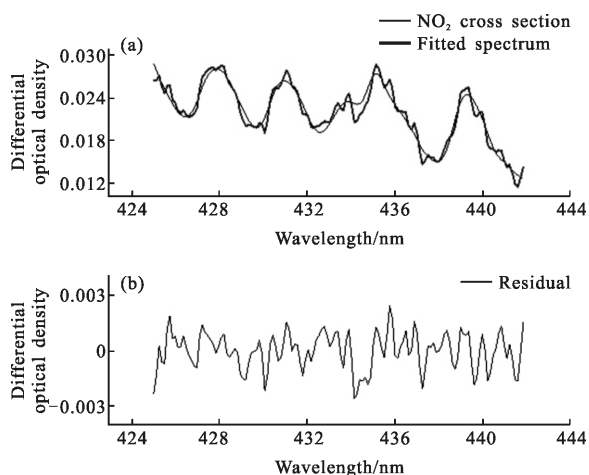


图 8 DOAS 反演 NO<sub>2</sub> 柱浓度实例

Fig.8 DOAS inversion of NO<sub>2</sub> concentration

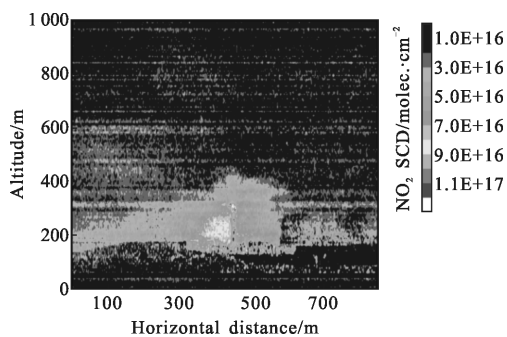


图 9 观测区域 NO<sub>2</sub> 斜柱浓度二维分布

Fig.9 Two-dimensional distribution of NO<sub>2</sub> slant column intensity

## 4 结论

文中对机载成像光谱仪系统从设计原理与系统组成进行了介绍,重点研究了其 CCD 成像电路的设计过程。最后搭建了成像光谱仪的地基观测装置,开展了电厂区域 NO<sub>2</sub> 污染的观测试验,通过扫描测量获取了观测区域的图像及光谱数据,并通过 DOAS 算法实现了 NO<sub>2</sub> 气体的二维成像解析。试验结果进一步验证了成像光谱仪及 CCD 成像电路设计满足污染气体观测的需求。设计的机载紫外 DOAS 成像光谱仪系统成像分辨率为 0.286°, 相较于德国海德堡机载系统的 0.88°<sup>[13]</sup> 和德国不莱梅机载系统的 1.4°<sup>[14]</sup>,在国内外紫外波段污染气体观测成像光谱仪系统中处于领先水平,并且该系统是差分吸收光谱技术领域,同类星载设备移植到飞机平台的一尝试。

## 参考文献:

[1] Liu Jin, Si Fuqi, Zhou Haijin, et al. Observation of two-dimensional distributions of NO<sub>2</sub> with airborne imaging DOAS technology [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64 (3): 034217. (in Chinese)  
刘进, 司福祺, 周海金, 等. 机载成像差分吸收光谱技术测量区域 NO<sub>2</sub> 二维分布研究[J]. 物理学报, 2015, 64(3):034217.

[2] Zhao Qichang, Yang Yong, Li Yefei, et al. Development status and trends of atmospheric trace gas remote sensing instruments [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 156-162. (in Chinese)  
赵其昌, 杨勇, 李叶飞, 等. 大气痕量气体遥感探测仪发展现状和趋势[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 156-162.

[3] Wang Yu, Lu Yihuai, Zhao Xin, et al. Design and implementation of CCD imaging circuit for satellite-borne DOAS spectrometer [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 6: 663-668. (in Chinese)  
王煜, 陆亦怀, 赵欣, 等. 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, 6: 663-668.

[4] Gao Minguang, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, et al. Remote sensing of atmospheric trace gas by airborne passive FTIR [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(12): 2203-2206. (in Chinese)  
高闽光, 刘文清, 张天舒, 等. 机载 FTIR 被动遥测大气痕量气体[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(12): 2203-2206.

[5] Li Shuang, Qiu Zhenwei, Wang Xiangjin. Stray light

- simulation and analysis of space-borne spatial heterodyne spectrometer for monitoring greenhouse gases [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 616–619. (in Chinese)
- 李双, 裘桢炜, 王相京. 星载大气主要温室气体监测仪杂光模拟分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 616–619.
- [6] Zhang Hao, Fang Wei, Ye Xin, et al. Dual-order overlapped Offner imaging spectrometer in middle-and long-wave infrared regions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 23(4): 965–974. (in Chinese)
- 张浩, 方伟, 叶新, 等. 中/长波红外双衍射级次共路 Offner 成像光谱仪[J]. 红外与激光工程, 2015, 23(4): 965–974.
- [7] Liu Jin. Observation of the concentration and distribution of polluted gas based on imaging differential optical absorption spectroscopy technique [D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- 刘进. 基于成像 DOAS 技术的污染气体浓度分布监测方法研究[D]. 合肥: 中国科学院大学, 2015.
- [8] E2V technologies. Datasheet for CCD47–20 back illuminated high performance AIMO [EB/OL]. [2006] <http://www.opticsjournal.net>.
- [9] Li Yapeng, He Bin, Fu Tianjiao. Design of imaging system of interline area CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2602–2606. (in Chinese)
- 李亚鹏, 何斌, 付天骄. 行间转移型面阵 CCD 成像系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2602–2606.
- [10] Zhang Lin, Li Yongxin, Hu Xueyou. Research on CCD video signal processing based on correlated double sampling [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007, 2: 33–37. (in Chinese)
- 张林, 李永新, 胡学友. 基于相关双采样技术的 CCD 视频信号处理研究[J]. 宇航计测技术, 2007, 2: 33–37.
- [11] Chen Wei, Zheng Yuquan, Xue Qingsheng. Airborne imaging and spectrometer with wide field of view large relative-aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 15–21. (in Chinese)
- 陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 15–21.
- [12] Specifications datasheet for Analog Devices AD9814 Complete 16-bit imaging signal processor [EB/OL]. <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/ad9144.html>.
- [13] Heue K P, Wagner T, Broccardo S P, et al. Direct observation of two dimensional trace gas distribution with an airborne imaging DOAS instrument [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2008, 8(3): 6707–6717.
- [14] Schönhardt A, Altube P, Gerilowski K, et al. A wide field-of-view imaging DOAS instrument for two-dimensional trace gas mapping from aircraft [J]. *Studies in Health Technology & Informatics*, 2014, 7(4): 3591–3644.