

文章编号 1004-924X(2017)08-2204-08

CCD 数字像元的合并方法及其应用

常 振^{1,2}, 王 煜^{1*}, 司福祺¹, 周海金¹, 赵敏杰¹, 刘文清¹

(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:星载差分吸收光谱仪中的科学级帧转移型电荷耦合器件(CCD)通常使用四行像元合并(4-Binning)方法提升载荷的信噪比,但该方法仅能工作在目标光强较弱的环境。为使载荷适应目标光线较强的环境,设计了数字像元合并方法(4-AVR)来提升载荷的探测能力。考虑相对常规的4-Binning方法,4-AVR方法会产生CCD信号衰减现象,故对这一现象进行了理论分析,得到由于CCD读出速率导致的信号衰减系数为0.699。在实验室搭建了测试装置,验证了上述结果,结果表明,4-AVR方法下获取的CCD像素值相对于4-Binning方法获取的像素值的衰减系数为0.698,从而证实了理论分析的正确性。实验显示,使用这一系数可完成对4-AVR方式下获取的像素值的校正,从而实现两种方法的无差别化。将校正方法作为载荷一级数据处理的一部分,进行了大气痕量气体的反演测试。结果表明数字像元合并方法可保证大气痕量气体的反演精度,进一步验证了数字像元合并方法的可靠性。

关键词:星载光谱仪;差分吸收光谱仪;电荷耦合器件;像元合并;数值校正

中图分类号:TP73;TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172508.2204

Digital binning method for CCD pixels and its applications

CHANG Zhen^{1,2}, WANG Yu^{1*}, SI Fu-qi¹, ZHOU Hai-jin¹, ZHAO Min-jie¹, LIU Wen-qing¹

(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)

* Corresponding author, E-mail: yuwang@aiofm.ac.cn

Abstract: Scientific grade frame-transfer Charged Coupled Devices(CCDs) in a space-borne differential optical absorption spectrometer usually use a Pixel Binning (4-Binning) method to improve its Signal-to-Noise Ratios(SNRs). It is only suitable for the quite weak radiation. To allow the spectrometer to be used for stronger radiation and to expand its detection ability, a digital pixel binning method, 4-AVR, was designed. Comparing to the 4-Binning method, this 4-AVR method brings the attenuation of CCD signals. Therefore, the attenuation was researched theoretically, and a signal attenuation coefficient 0.699 due to the CCD signal readout speed was obtained. Then, testing devices were built in the lab to get the data of pixel values of CCD in both 4-Binning and 4-AVR methods. The result shows that the attenuation coefficient of CCD pixel values is 0.698, which verifies the theoretical result. The experiment demonstrates that the coefficient can be used to correct the pixel values gained in the 4-AVR method to implement the consistency of two methods. By taking the correction as a part of 1-B

收稿日期:2017-02-09;修订日期:2017-04-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41275037);安徽省自然科学基金资助项目(No. 1408085MKL49);安徽省杰出青年科学基金资助项目(No. 1308085JGD03)

data processing, the tests of atmospheric trace gases were retrieved, and results indicate that the method ensures the quantitatively data of the space-borne spectrometer, which verifies the reliability of the method.

Key words: space-borne spectrometer; differential absorption spectrometer; CCD; pixel binning; data correction

1 引 言

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代发展起来的一种新型光学遥感仪器,经过 30 多年的飞速发展,已经广泛用于科学研究、航空航天以及军事等领域。目前已经有多颗成像光谱仪在轨运行,可实现对大气痕量气体的探测,如 SCIAMACHY (Scanning Image Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) 和 OMI (Ozone Monitor) 等。我国目前尚无类似成像光谱仪在轨运行,故缺乏对大气痕量气体的检测能力^[1-2]。为了应对日益迫切的环境污染问题,我国亦开展了星载差分吸收光谱仪的研制工作。星载差分吸收光谱仪通过探测地球大气或地表反射、散射的紫外/可见光,利用差分吸收光谱技术可以反演大气中痕量气体的分布和变化^[3]。

成像系统获取的数字响应值不能直接用于数据反演,还需要进行一些预处理操作^[4],如电路偏置校正、暗电流校正、拖尾效应校正、PRNU (Photo Response Nonuniformity) 像元响应的非一致性校正、平场校验以及几何校正^[5-6]等,最终获取到载荷的辐亮度信息,供于反演的一级数据产品。

星载差分吸收光谱仪观测光谱为 240~710 nm,其中太阳散射光在紫外波段强度较弱,因此如何实现弱光信号的高信噪比探测是研制过程中的关键技术之一。虽然 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 器件具有全局曝光和轻量化的设计优势,但深空探测仍以 CCD (Charged Coupled Device) 为主^[7]。星载差分吸收光谱仪光电探测器选择的是科学级帧转移型 CCD,其中紫外通道采用 CCD 47-20,可见通道采用 CCD 55-30。由于 CCD 47-20 的抗辐射性能较弱,在轨运行时会产生辐射损伤,故需通过平场校验来实现对损伤像元的重新标定。星载差分吸收光谱仪的 CCD 读出电路中设计 4 行 Binning (像元合并) 模式,可以提升 CCD 的信噪比,对弱光探

测十分有利^[8-9],完成 4-Binning 功能的前提是 CCD 最后一行输出行的势阱深度需是其他普通像元势阱深度的 4 倍以上^[10]。国外同类卫星载荷 OMI 也使用了 Binning 工作模式,并且为了满足 Binning 条件,其向厂家定制了加深读出势阱深度的 CCD。由于器件的限制,本项目订购的器件 CCD 47-20 输出行的势阱深度只有正常像元势阱深度的 3 倍,CCD 55-30 输出行与正常像元势阱深度相同。因此,载荷在 4-Binning 模式下工作时,如目标亮度较大时,最后一行输出行可能会出现电荷的溢出。为了解决这一问题,本文提出了数字像元合并 (4-AVR) 的方法。文中对该方法进行了描述,并针对该方法带来的问题进行了研究和处理。此处理与上述几项处理共同构成星载差分吸收光谱仪一级数据处理。

2 CCD 像元合并方法

2.1 工作原理

CCD 47-20 和 CCD 55-30 都是帧转移面阵 CCD,采用三相式时钟驱动方式完成帧转移、行转移和水平读出。不使用 Binning 模式时,每进行一次行转移,都进行一次水平读出。在多行 Binning 模式下,进行多次行转移且一次水平读出。

Binning 就是把若干像元合并在一起,提高单一探测点的电荷数量。大气痕量气体差分吸收光谱仪设有 4 行像元合并的功能,即将 4 行像元并做一行输出。操作过程为,驱动时序进行 4 次行转移,将 4 行的电荷转移到水平读出寄存器中,接着做一次水平读出,称这种方式为模拟像元合并 (4-Binning)。完成此功能的前提是 CCD 最后一行输出行的像元势阱深度至少是正常像元势阱深度的 4 倍,否则可能会造成电荷的溢出。星载差分吸收光谱仪所使用的光电探测器最后一行读出的势阱深度仅为正常像元势阱深度的 3 倍。因此,在目标亮度较高时,准确来说是信号强度达到满阱电荷数的 75% 以上时,无法使用 4-Bin-

ning 工作方式。

为避免可能出现的电荷溢出,一种有效的解决方案是把每一行数据都传输到地面,在地面数据处理时再把每 4 行叠加到一起。CCD 信噪比 R_{SN} 与满阱电荷 N 数的关系为:

$$R_{SN} = \sqrt{N}. \quad (1)$$

因此,这样做在原理上同样将测量信噪比提高到不做像元合并时的 2 倍。但是这一方法将原有的数传数据量增加了 4 倍,卫星信道资源不允许。为此,在保证信噪比与 4-Binning 工作方式相当的前提下,本文设计了数字像元合并(4-AVR)工作方式,即 CCD 逐行输出,然后在 CCD 成像电路的 FPGA(Field Programming Gate Array)内部运算,每 4 行数据做数字叠加后输出给卫星数传系统。

2.2 数字像元合并设计

以 CCD 47-20 的 4-AVR 工作方式为例进行

分析。数字像元合并的具体过程为:将第一行的数据通过水平读出寄存器读出到外部的 RAM(Random Access Memory)中,接着读出第二行数据并与第一行数据相加后回存到 RAM 中,第 3、4 行数据也是同样的操作;四行数据叠加完成后,RAM 中存放的数据是 4 行数据的累加,即实现了像元的数字合并(4-AVR);最后将累加后的数据打入数传通讯发送单元,同时清空数据叠加行 RAM。如此循环操作 256 次,一幅 CCD 图像的 1 024 行即完整读出,并且合并为 256 行数据传送给卫星数据传输系统向地面转发。

采用 0.5 s 曝光时间时,CCD47-20 在 4-Binning 和 4-AVR 工作模式下的 FPGA 驱动时序仿真波形如图 1 所示。图 1 中 S1、S2、S3 是 CCD 存储区的垂直转移时钟(3 相),R1、R2、R3 是水平读出时钟。

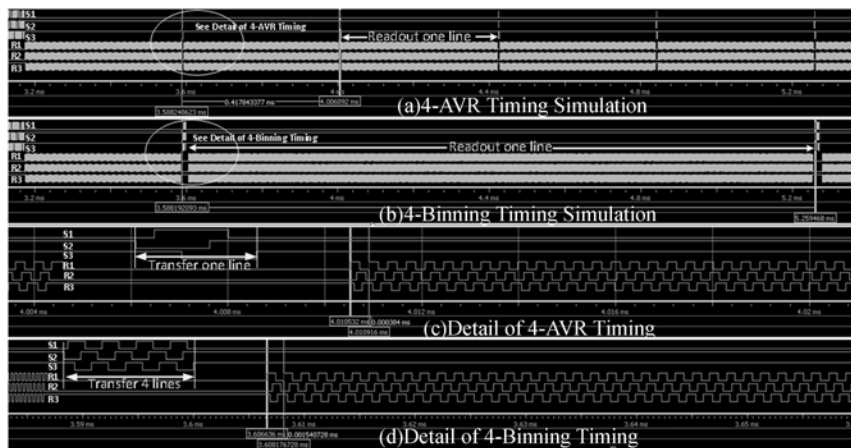


图 1 CCD47-20 在 4-AVR 及 4-Binning 工作模式下的 FPGA 时序仿真图

Fig. 1 Timing simulation of FPGA in 4-Avr&4-Binning mode

由图 1(a)、(b)可见,在 4-Binning 模式下,一次水平读出时间为在 4-AVR 模式下的 4 倍。即在 4-AVR 模式下 CCD 的读出速率约为在 4-Binning 模式下的 4 倍。图 1(c)、(d)分别是两种工作模式下垂直转移时钟和水平读出时钟时序仿真图的细节。

根据 CCD47-20 技术手册,其最大读出速率(Maximum Readout Frequency)为 5 MHz。但是这一速率涵盖了所有的应用,即应用在观察设备且对图像精度没有较高要求的场合可以使用这一

速率。对于测量设备,如光谱仪,由于对测量精度有着较高的要求,CCD 无法使用 5 MHz 的读出频率。CCD47-20 应用于测量设备时,典型读出频率为 1 MHz。这是由于 CCD 内部读出电路存在带宽的限制,过高的读出速率会造成信号的失真。星载差分吸收光谱仪要求在 0.5、1、2 和 4 s 4 种曝光方式下工作。在 0.5 s 曝光时间、4-AVR 工作方式下,CCD47-20 采用了 2.11 MHz 的读出频率、CCD55-30 采用了 1.413 MHz 的读出频率,这会导致信号波形的失真,进而造成后续进行

AD 转换时的数值衰减,如图 2 所示。为方便后续的数据处理,校正载荷工作在 0.5 s 曝光时间、

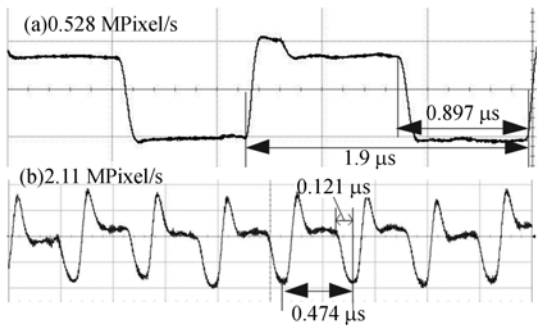


图 2 CCD47-20 在两种工作模式下的信号输出对比
Fig. 2 CCD signals in 4-Binning & 4-AVR modes

4-AVR 工作方式下的 CCD 像素值,必须对衰减情况进行研究和分析。因为采用 1、2 和 4 s 曝光时间时,探测器在 4-AVR 工作模式下的读出速率不超过 1 MPixel/s,CCD 信号失真较弱,无须进行校正。

3 4-AVR 校正理论分析

以 CCD47-20 为例,分析 4-AVR 工作模式下的 CCD 像素值校正,CCD55-30 的校正过程与此类似,在此不做赘述。

3.1 CCD 读出电路系统模型

CCD47-20 读出电路结构如图 3 所示。 $R\Phi$ 为水平读出驱动时钟; T 为复位晶体管,其漏极接复位电平 V_R ;Amp 是输出放大器;SS 为 CCD 衬底电压; R_L 为负载电阻, V_o 为输出电压信号。

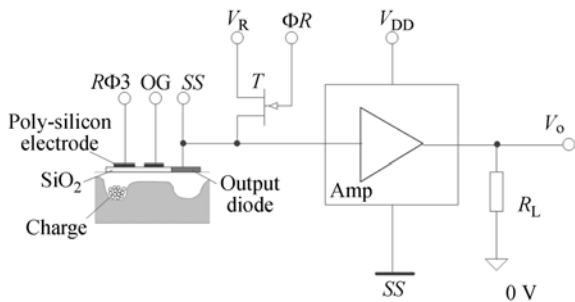


图 3 CCD47-20 输出电路结构图
Fig. 3 Output circuit structure of CCD47-20

CCD 输出电路主要部分是放大器,具有低通特性。为了计算方便,将该 CCD 输出电路结构等效为一阶系统,系统框图如图 4 所示。

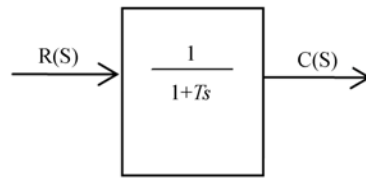


图 4 CCD 输出电路的系统框图
Fig. 4 System schematic of CCD47-20 output circuit

设置载荷的工作方式为 0.5 s、4-Binning,测量 CCD 实际输出信号。分析得到信号波形的上升时间 t_r 为 170 ns,由公式(2)、(3)算得等效的一阶系统的时间常数 $T=0.456$, $t_r=77.52$ ns。 t_1 、 t_2 分别是系统在单位阶跃信号激励下,响应信号上升到稳态值的 10% 和 90% 时对应的时间。

$$1 - e^{-t_1/T} = 0.1, \quad (2)$$

$$1 - e^{-t_2/T} = 0.9, \quad (3)$$

$$t_r = t_2 - t_1. \quad (4)$$

调整 CCD 的入射光强,得到输出信号的波形并进行分析,发现所得系统常数基本不变,验证了系统模型构建的可行性。

3.2 衰减系数的理论推导

为了抑制复位噪声,载荷的 CCD 成像电路使用了相关双采样法对模拟信号进行采样。相关双采样是在 CCD 的同一个像素周期内,对 CCD 输出的参考电平和信号电平进行两次采样。两次采样的差值即是 CCD 的信号幅值^[11]。

在 4-Binning 和 4-AVR 工作模式下(曝光时间均为 0.5 s),CCD 读出频率分别为 0.528 MHz 和 2.11 MHz,即单个像元的读出时间分别为 1.9 μs 和 0.474 μs,如图 2 所示。

CCD 信号在理想状态下的输出应为多个方波的叠加,如图 5 中的实线所示。理想状态是指 CCD 输出电路的带宽为无限大。事实上,由于输出电路带宽的限制,CCD 信号变成图中虚线所示的形状。图 5 中 S1、S2 为相关双采样的前后采样点,为了防止后采样点采集到复位信号,需要在复位脉冲到来前进行采样,一般提前一个系统周期(27.8 ns); T 为系统时间常数(此处将输出电路等效为时间常数为 77.52 ns 的一阶系统),上下两部分分别为采用 0.528 MHz 和 2.11 MHz 读出频率时的 CCD 信号示意图。

由图 5 可见,对于同样数量的电荷(曝光时间、入射光强相等),使用不同的读出速率经 CCD

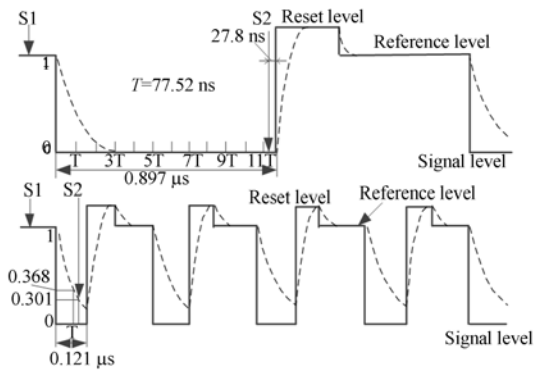


图 5 CCD 输出信号波形示意图
Fig. 5 Diagram of CCD signal

输出电路得到的信号会产生不同程度的衰减。在使用 0.528 MHz 的读出频率时,相关双采样电路的后采样点 S2 采集到的是下降到底的信号电平 V_{∞} ;读出速率为 2.11 MHz 时,S2 采样点采集的 CCD 信号尚未下降到底,采集到的电平为 V'_{∞} 。两次采样的前采样点 S1 采集到的电平分别为 V_{S1} 和 V'_{S1} 。由图 5 和一阶系统的时域表达式可知:

$$V_{S1} = V'_{S1} = e^{-t/T} = 1, \quad (5)$$

其中 $t=0$ 。

$$V_{\infty} = e^{-t/T} = 1.354 \times 10^{-5} = 0, \quad (6)$$

式中 $t=897-27.8=869.2(\text{ns})$ 。因此,其衰减系数 η 为:

$$\eta = \frac{1 - V_{\infty}}{V_{S1}} = 1, \quad (7)$$

$$V'_{\infty} = e^{-t/T} = 0.301, \quad (8)$$

式中 $t=121-27.8(\text{ns})=93.2(\text{ns})$,于是得到其衰减系数 η' 为:

$$\eta' = \frac{1 - V'_{\infty}}{V'_{S1}} = 0.699. \quad (9)$$

因此,理论上由于 CCD 读出速率的原因而导致的 4-AVR 工作方式相对于 4-Binning 方式下 CCD 信号的衰减系数为 0.699。

4 数字像元合并方法的实现

硬件电路采用 Xilinx 公司的 FPGA 器件完成逻辑功能。其他电路还包括配电电路,通讯接口电路等,如图 6 所示。CCD 成像电路包括驱动时序发生器、A/D 转换器、数据采集逻辑和数据存储器。驱动时序发生器根据操作指令,产生相

应的 11 路时钟。11 路时钟经驱动器驱动 CCD 工作。CCD 输出的视频信号经 A/D 转换后,成为数字图像信号,缓冲到两个 RAM 构成的乒乓缓存器,每次缓存一行的数据。

数字像元合并方法的具体实现由 FPGA 中的 CCD 驱动时序发生器完成。

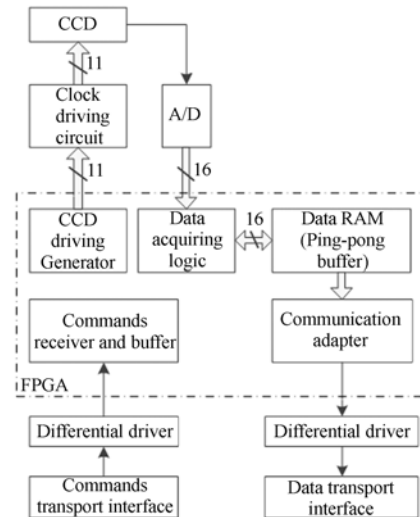


图 6 CCD 时序驱动电路的设计框图
Fig. 6 Schematic of CCD driving circuit

5 测试及结果分析

5.1 CCD 像素值校正测试

为了验证对 CCD 像素值校正的准确性和精度,本文使用了积分球辐射源作为光源进行测试。积分球型号为 Lapsere XTH-200C。测试装置如图 7 所示。装置中使用了星载差分吸收光谱仪便携式地面检测台,可以使用笔记本电脑(PC)实现对载荷曝光时间、工作方式的调节以及数据的存储^[12]。

根据图 7 所示的装置连接好设备,调整 CCD 到积分球出口处的距离为积分球出口口径的 4.5 倍,以使 CCD 获得较好的均匀光^[13]。首先设置载荷在 4-Binning 方式下工作,曝光时间为 0.5 s,打开积分球,调整辐射亮度,使得读出 CCD 像素值最大为 2 500 左右,连续获取 20 幅图像。随后设置载荷在 4-AVR 模式工作下,保持积分球辐射亮度不变,获取 20 幅图像。选取被光源照亮区域的特定一行像元,对其像素值进行分析。为了消除噪声对校正精度的影响,求取该行像元在 20

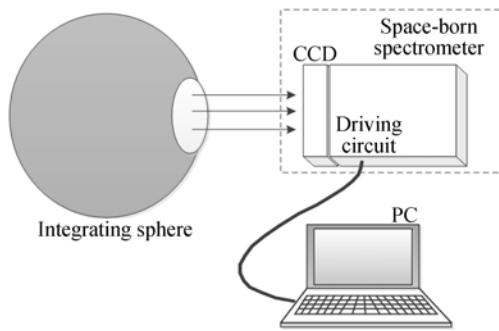


图 7 测试装置示意图
Fig. 7 Diagram of test devices

幅图像中的平均值。

求得两种工作模式下 CCD 像素值在该行不同位置的衰减系数如图 8 所示。求得衰减比例的平均值为 0.698,标准偏差为 0.007 05,测试结果与理论分析值吻合。

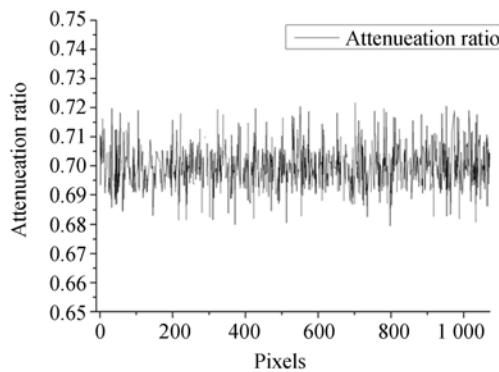


图 8 两种工作方式下 CCD 像素值的比值
Fig. 8 Ratios of CCD pixel values in 4-AVR mode and 4-Binning mode

这一结果验证了前述理论的正确性。根据所得到的衰减系数的拟合曲线即可实现对 4-AVR 工作模式下 CCD 像素值的校正。

5.2 4-AVR 工作模式对气体反演的影响测试

为进一步验证数字像元合并方法是否适用于大气痕量气体反演,采用不同浓度的 NO₂ 标准样气进行测试,通过对比测量浓度与真实浓度的差异,评价测量精度。测量方案如图 9 所示,选用太阳散射光作为光源,调整样品池的位置位于卫星载荷前,在样品池两端增加光阑以保证进入光谱仪的光线能够完全经过样品池内部,防止透过样品池玻璃外壁的干扰光线对测量造成影响;另外通过流量计控制气流稳定。

图 10 所示为 EMI 载荷中心视场观察到的太

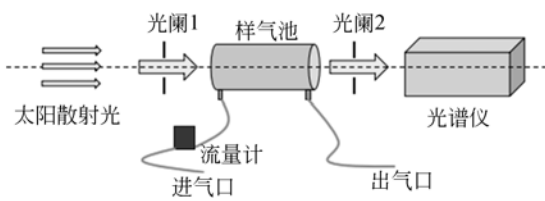


图 9 样气测量示意图
Fig. 9 Diagram of sample gas test

阳散射光谱。样品池长度(L=15 cm)即为样气吸收的有效光程,可计算出样气的积分浓度。在实际样气测量操作中,需要在每一次样气测量前都充入氮气对样品池进行清洁,以保证测量值的有效性。实验流程为:(1)充入氮气约 2 min 清洁样品池;(2)采集灯谱及暗电流;(3)充入样气约 2 min 后采集样气吸收谱。

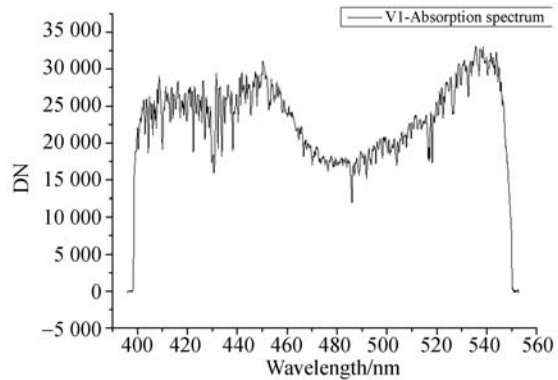


图 10 太阳散射光谱
Fig. 10 Scattered spectrum of solarlight

NO₂ 测试选择的标准样气 254×10^{-6} , 测量三次。采用差分吸收光谱算法(DOAS)进行气体浓度反演^[14-15],选择拟合的光谱为 425~450 nm,图 11 为 NO₂ 拟合效果图。气体反演柱浓度平均

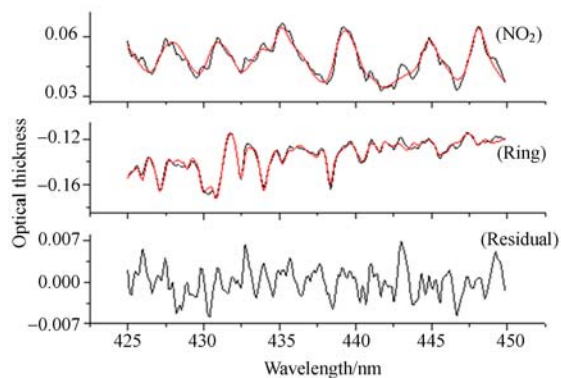


图 11 NO₂ 气体柱浓度反演结果拟合图
Fig. 11 Fitting results of NO₂ column density retrieving

值为 9.26×10^{16} molec./cm², 根据样品池长度 L , 经 DOAS 拟合后可得到样品池内 NO₂ 浓度为 246.93×10^{-6} , 标准值偏差为 2.78%。

由此可见, 数字像元合并工作模式不会影响大气痕量气体反演的精度, 从而保证了数字像元合并方法的可行性。

6 结 论

星载差分吸收光谱仪需要使用像元合并的功能。由于器件受限的原因, 模拟像元合并功能对于探测目标的光强有要求, 使得这一功能的应用范围有限。为此, 设计了数字像元合并的功能, 在不额外占用卫星信道资源的前提下, 实现了像元合并的功能, 增强了载荷的探测能力。

文章论述了星载差分吸收光谱仪数字像元合

并的工作原理和设计过程, 该数字像元合并法代替模拟像元合并法解决了航天工程中器件受限的问题。对 4-AVR、0.5 s 曝光时间工作模式下 CCD 像素值的衰减进行了理论分析, 得到 4-AVR 工作模式相对于 4-Binning 工作模式下 CCD 信号的衰减系数为 0.699。通过实验数据分析, 得到两种模式下 CCD 像素值的平均衰减系数为 0.698, 验证了理论模型结果, 并得到了衰减系数随像素值变化的拟合曲线。通过衰减系数可对 4-AVR 工作模式下的 CCD 像素值进行校正。该校正是载荷一级数据处理的重要部分, 保证了载荷数据辐射定标精度, 满足后期定量反演的需求。使用数字像元合并方法进行了大气痕量气体反演测试, 结果表明这一方法不会影响大气痕量气体的反演精度, 进一步保证了数字像元合并方法的可靠性。

参考文献:

- [1] 赵敏杰, 司福祺, 江宇, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 567-574.
ZHAO M J, SI F Q, JIANG Y, *et al.*. In-lab Calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 567-574. (in Chinese)
- [2] 周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱定标技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(11): 2881-2885.
ZHOU H J, LIU W Q, SI F Q, *et al.*. Spectral Calibration for space-borne differential optical absorption spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(11): 2881-2885. (in Chinese)
- [3] 赵敏杰, 邹莹, 司福祺, 等. 星载痕量气体差分吸收光谱仪非均匀性校正研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(9): 2578-2582.
ZHAO M J, ZOU Y, SI F Q, *et al.*. Study on the non-uniformity calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(9): 2578-2582. (in Chinese)
- [4] 朱时良, 梁金星. 宽带多光谱成像系统 CCD 响应的线性化校正方法[J]. 包装学报, 2016, 8(1): 68-73.
ZHU SH L, LIANG J X. Linear correction method of CCD response for wide-band multi-spectral imaging systems[J]. *Packaging Journal*, 2016, 8(1): 68-73. (in Chinese)
- [5] LEVELT P F, NOORDHOEK R. OMI algorithm theoretical basis document volume I: OMI instrument, level 0-1b processor, calibration & operations[R]. Tech. Rep. ATBD-OMI-01, Version 1.1. 2002.
- [6] 周前飞, 刘晶红, 居波, 等. 面阵 CCD 航空相机斜视图的几何校正[J]. 液晶与显示, 2015, 30(3): 505-513.
ZHOU Q F, LIU J H, JU B, *et al.*. Geometric correction of oblique images for array CCD aerial cameras[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(3): 505-513. (in Chinese)
- [7] 王征, 何云丰, 曹小涛, 等. 基于 FPGA 的大面阵 CMOS 相机高速率电子学系统设计[J]. 液晶与显示, 2016, 31(2): 173-178.
WANG ZH, HE Y F, CAO X T, *et al.*. Design of large area array CMOS of high speed electronics camera system based on FPGA[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2): 173-178. (in Chinese)
- [8] LI H, ZHANG H, GUO X L, *et al.*. Image restoration after pixel binning in image sensors[J]. *Tsinghua Science & Technology*, 2009, 14(4): 541-545.

- [9] 韦晓茹, 蔡志坚, 居戡之. CCD 的 Binning 技术在光信号测量中的应用研究[J]. 光学仪器, 2013, 35(2): 11-14.
WEI X R, CAI ZH J, JU J Z. Research on Binning technique in light measuring [J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(2):11-14. (in Chinese)
- [10] 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, 45(6): 663-668.
WANG Y, LU Y H, ZHAO X, *et al.*. Design and implementation of CCD imaging circuit for satellite-borne DOAS spectrometer[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(6):663-668. (in Chinese)
- [11] 郭伟强, 万志, 常磊, 等. 面阵 CCD 信号采集系统的噪声抑制[J]. 发光学报, 2008, 29(1): 204-208.
GUO W Q, WAN ZH, CHANG L, *et al.*. Noise suppression of area array CCD Signal acquisition [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, 29(1): 204-208. (in Chinese)
- [12] CHANG Z, WANG Y, ZHAO X, *et al.*. LVDS-USB-adaptor applied to spectrometers[C]. *Solid-State and Organic Lighting 2014. Optical Society of America*, 2014:JW6A.9.
- [13] 王洪超, 刘红元, 王恒飞, 等. CCD 系统增益标定及不确定度评定[J]. 光学学报, 2015, 35(S1): s112004.
WANG H CH, LIU H Y, WANG H F, *et al.*. System gain calibration of CCD and evaluation of uncertainty [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(S1): s112004. (in Chinese)
- [14] PLATT U, STUTZ J. 2008. *Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Applications*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 314-330.
- [15] WAGNER T, CHANCE K, FRIEß U, *et al.*. Correction of the ring effect and I₀-effect for DOAS observations of scattered sunlight[C]. *Proceedings of the 1st DOAS Workshop*, 2001: 1-13.

作者简介:



常 振(1988—),男,安徽合肥人,博士研究生,2012 年于安徽师范大学获得学士学位,主要从事 CCD 成像技术方面的研究。E-mail: zhchang@aiofm.ac.cn

导师简介:



王 煜(1971—),男,北京人,研究员,1993 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2005 年于英国斯特莱斯克莱德大学获得博士学位,现为安徽光学精密机械研究所光谱成像电子技术研究室主任,中科院“百人计划”成员,主要从事航空、航天遥感设备研发,承担安徽光机所星载光谱仪设备的电子系统研发工作至今。E-mail: yuwang@aiofm.ac.cn