

文章编号:1002-2082(2019)04-0557-06

可见近红外波段光谱辐射采集系统的设计与应用

周安萌^{1,2}, 刘恩超¹, 李 新¹, 郑小兵¹

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要:针对目前卫星遥感器进行场地定标的光谱观测仪器的应用需求,设计了可见近红外波段($0.4 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$)的光谱辐射采集电路系统,并结合光谱辐射采集模块进行了应用与数据分析。重点介绍了线阵探测器的选型与驱动需求,并完成了基于 STM32 微处理器的设计。结合辐射观测需求,在信号处理部分使用仪表放大器运放对探测器的模拟输出信号进行处理,并采用 STM32 内部的 A/D 转换器采集。分析数字信号输出的结果,该辐射测量电路系统的采集数据达到了 1 LSB 的数据精度($\leq 0.8 \text{ mV}$)。探测器电路系统应用到光谱辐射采集模块中,进行了户外应用与数据分析,光谱辐照度比对结果的偏差小于 5%。光谱辐照度的比对结果证明整个系统可以直接进行产品应用,满足野外辐射测量数据的可靠性获取。

关键词:线阵传感器; STM32 微处理器; 信号处理; 野外辐射测量

中图分类号:TN216; TP274

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0401005

Design and application of visible-near infrared band spectral radiation acquisition system

ZHOU Anmeng^{1,2}, LIU Enchao¹, LI Xin¹, ZHENG Xiaobing¹

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Aiming at the application requirements of spectral observers for test site calibration of satellite remote sensors, we designed a spectral radiation acquisition circuit system with visible near-infrared ($0.4 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$), and conducted the analysis on the application and data combining with the spectral radiation acquisition module. We mainly introduced the selection and driving requirements of the linear array detectors, the design based on STM32 microcontroller unit (MCU) was completed. According to the radiation observation requirements, we processed the analog output signal of the linear sensor by instrumentation amplifier in the signal processing section, and used the A/D converter in STM32 for collection. By analyzing the results of digital signal output, the data collection of the radiation measurement system has achieved the accuracy of 1LSB (less than 0.8 mV). Furthermore, we applied the detector circuits system to the spectral radiation acquisition module, and carried out the outdoor application and data analysis. Results show that the deviation of the comparison result of spectral irradiance is less than 5%. The comparison results of the spectral irradiance prove that the whole system can be directly

收稿日期:2018-12-21; 修回日期:2019-03-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0504800, 2018YFB0504803); 国家自然科学基金项目(41705013)

作者简介:周安萌(1995—),女,硕士研究生,主要从事光谱辐照度测量设备研究。E-mail:annm@mail.ustc.edu.cn

导师简介:李新(1975—),男,研究员,博士生导师,主要从事光辐射高精度定标、光学精密仪器设计研究。

E-mail:xli@aiofm.ac.cn

通信作者:刘恩超(1985—),男,博士,主要从事光谱辐射测量设备设计与应用方面的研究。E-mail:liuech@aiofm.ac.cn

applied to the product and meet the reliability acquisition of field radiation measurement.

Key words: linear array sensor; STM32 MCU; signal processing; field radiation measurement

引言

随着“十二·五”阶段越来越多的光谱卫星遥感器的发射,卫星遥感器的场地定标对光谱辐射观测仪器也提出了更高的需求^[1]。为满足野外辐射测量仪器的数据采集精度与可靠性需求,本文研制了一套可见近红外波段的光谱辐射测量电路系统,该系统的成功研制可以应用到光谱辐射测量模块并直接用于野外辐射测量仪器中,为卫星遥感器场地定标的辐射测量仪器的研制提供了技术基础。

国外光谱仪技术发展较为成熟,已成功研制了一些高性能的仪器,如日本的 MS-700DNI 太阳辐射计用于 350 nm~1 050 nm 波段太阳直射光谱辐射量的室外连续观测,美国的 OL756 是一款高精度、紫外到近红外波段的便携式光谱辐射仪^[2],可以在实验室或野外实现高精度的光谱辐射测量,美国的 SVC 是手持便携式光谱分析仪^[3],可以实现 350 nm~2 500 nm 的辐亮度观测。但这些设备价格高、采购周期长、技术固定,不适于满足国内技术需求的应用。而国内的光谱仪器还是以线阵 CCD 为探测器件进行设计^[4],这种技术虽然已经成熟,但是其可靠性、温度稳定性、精度上不适用于在野外的高低温环境下进行高精度观测。在分析了国外仪器的工作指标与性能以及国内仪器的技术后,设计了应用于野外辐射测量的光谱辐射测量系统,可以满足太阳反射谱段场地定标的地表特性观测。

根据野外仪器的工作环境与需求,选用高精度、低温漂的线阵传感器,并设计了基于 STM32 的驱动与数字化系统,保证观测性能的基础上简化了硬件与软件控制方面的工作。探测器输出信号经过仪表放大器电路处理后,由 STM32 内部的 A/D 转换器采集。最后针对整个电路系统的性能进行了数据分析,并给出了野外辐射测量的应用及比对结果。

1 探测器辐射采集系统设计

探测器辐射采集系统主要由线阵探测器、主控电路、模拟信号处理电路与电源部分组成,设计总体框图如图 1 所示。辐射采集系统以线阵探测

器为核心,采用微处理器 STM32F103 作为主控芯片完成驱动信号的生成和控制功能。探测器的辐射输出经过模拟信号处理电路后,由微处理器进行采集,并将采集结果发送到上位机,电源为各部分工作提供所需电压。

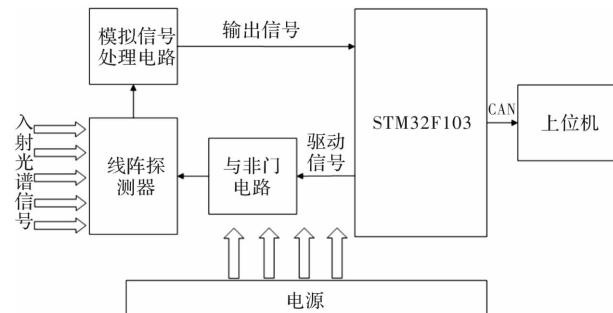


图 1 辐射测量系统电路设计

Fig. 1 Circuit design of radiation measurement system

1.1 线阵传感器工作原理

利用线阵传感器实现可见近红外波段的野外辐射测量,要求线阵传感器的光谱范围、像元尺寸、工作环境能够满足工作辐射观测、分辨率方面的要求。系统中选用了线阵图像传感器 S3924-512Q,表 1 给出了其性能参数^[5]。

表 1 线阵传感器性能参数

Table 1 Performance indicators of linear array sensor

探测器类型	Si PDA
探测器型号	S3924-512Q
致冷形式	非致冷
像元数	512
像元高度/mm	2.5
像元宽度/ μm	25
窗口材料	石英
光谱响应范围/nm	200~1 000
饱和输出电荷/pC	25
典型测量温度/°C	25

1.2 线阵传感器驱动设计

线阵传感器 S3924-512Q 工作时需要 4 路驱动时钟信号供电荷产生、转移和读出,其中包括移位脉冲 φ_1 、 φ_2 ,转移脉冲 φ_s ,复位脉冲 RESET。 φ_s 为低电平时,探测器进行光积分,此阶段不发生电荷转移。 φ_s 为高电平时,探测器将光积分转移至移位寄存器,移位寄存器在 φ_1 、 φ_2 作用下将电荷逐位移到输出端。在下一个信号到来前,RESET 对相元中的残余

信号进行清除。传感器时序如图 2 所示^[6]。

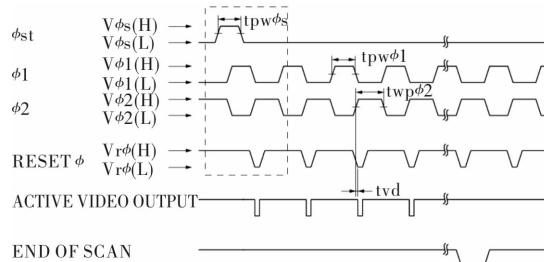


图 2 线阵传感器驱动时序

Fig. 2 Driving clocks of linear array sensor

采用 STM32 单片机的高级定时器产生 S3924-512Q 工作所需的时序驱动。 φ_1, φ_2 分别由 STM32 的高级定时器 TIM4_Channel1、TIM4_Channel2 产生。STM32 时钟主频为 72 MHz, TIM4 工作在 PWM2 模式, 设置 TIM4 自动重装载寄存器的值为 899, 输出比较值为 449, TIM4_Channel1 输出比较极性为低, TIM4_Channel2 输出比较极性为高^[7], 便可以产生频率为 80 kHz, 占空比 1 : 1 的两个反相时序波形。Channel1 和 Channel2 的输出信号分别经过 74ACT00 的两个与非门, 并转换为 5 V 电平后即得到驱动信号 φ_1, φ_2 。

RESET 由 STM32 的 TIM3_Channel1、TIM3_Channel2 产生。由 S3924-512Q 的驱动信号可以看出, 以 φ_2 的信号周期为标准, RESET 上升沿在 φ_2 的高电平期间, RESET 下降沿在 φ_2 的低电平期间。因此设计中采用定时器的两个通道输出两个占空比不同的脉冲, 经过与非门来产生所需信号。TIM3 工作在 PWM1 模式, 设置 TIM3 自动重装载寄存器为 899, Channel1 和 Channel2 的比较值分别为 240, 380, 输出比较极性为低。Channel1 和 Channel2 输出信号经过 74ACT00 与非门, 并转换为 5 V 电平得到驱动信号 RESET。

A/D 转换触发时序 (trigger) 通过 TIM4_Channel3 产生, 与 NMOS 图像传感器输出信号同步, 直接输出给 STM32 配置好外部中断触发的引脚 PA_5, 用于触发中断, 启动 A/D 转换器采集。STM32 高级定时器产生 PWM 波由 KEIL 中集成的 logic analyzer 仿真^[8] 如图 3 所示。

φ_s 配置到引脚 PA_10, 控制 I/O 口高低电平翻转产生一个脉冲, 使 φ_2 的下降沿落在 φ_s 的高电平, PA_10 输出信号在经过 74ACT00 与非门, 并

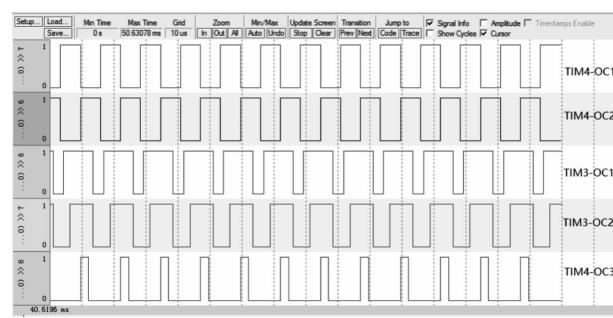


图 3 STM32 高级定时器产生 PWM 波仿真图

Fig. 3 PWM waveforms of STM32 advanced timer

转换为 5 V 电平得到驱动信号 φ_s 。STM32 产生的驱动信号经过与非门电路后时序图和在时序驱动下 S3924-512Q 的输出信号图如图 4 所示。其中 ST 为转移脉冲, P1、P2 为移位脉冲, RS 为复位脉冲, AD 为触发脉冲, SIGN 为线阵探测器输出信号。

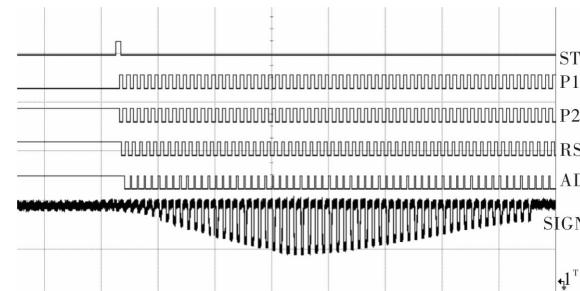


图 4 线阵传感器驱动时序和输出信号

Fig. 4 Driving clocks and output signal of linear array sensor

2 探测器信号处理与采集

2.1 模拟输出信号处理

采用正确的驱动时序提供到 S3924-512Q 中, 可以输出 Active Video 有效信号和 Dummy Video 暗电流信号。两路信号具有以下特点: 负极性, 有限信号幅值小、都叠加在 1.26 V 直流电压上。鉴于以上特点不能直接送入 A/D 转换器, 必须先从硬件上对其进行一系列预处理, 扣除直流本底信号及传感器暗电流引起的噪声, 因此系统设计采用 AD8220 来实现前端的差分和放大功能。AD8220 是输入轨至轨输出的仪表放大器, 其可调增益范围为 1~1 000 倍, 仅需要通过单电阻来设置^[9]。Active 和 Dummy 信号分别送至差分放大器的同相和反相输入端, 模拟信号处理电路设计如图 5 所示。

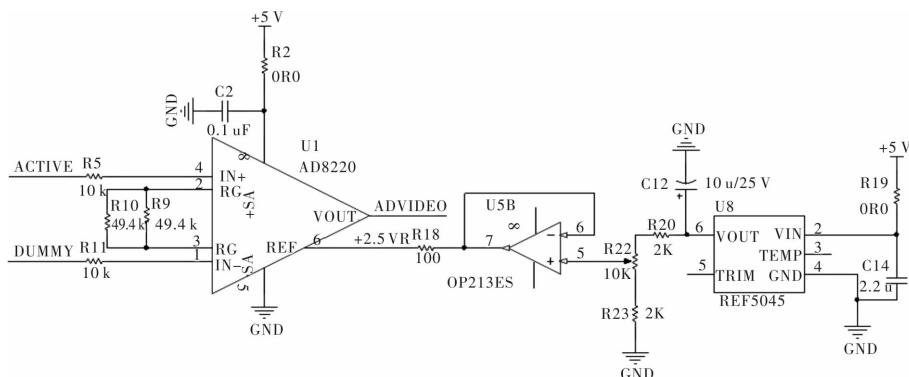


图 5 探测器输出信号预处理电路

Fig. 5 Preprocessing circuits of detector output signal

S3924-512Q 饱和输出电压幅值的典型值为 820 mV, AD8220 参考电压为 2.5 V, 因此差分放大电路可设的最大放大倍数 G 为 3 倍。设 R_G 是增益调节电阻, 则 AD8220 的增益与调节电阻的关系为

$$G = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (1)$$

在图 5 电路设计中, 预留了 2 个电阻 R_9 、 R_{10} 组成 R_G , 当放大倍数设定为 3 时, 其阻值大小可设置为 49.4 kΩ。

2.2 探测器信号采集

根据 S3924-512Q 输出信号的特点, 电路采样频率需大于 200 kHz, 最大转换电压为 2.5 V, 设计中采用了 STM32 内部 12 位高速 ADC 完成模数转换工作^[10], 满足测量要求且简化了电路结构。A/D 转换触发信号 AD 与 NMOS 传感器输出信号 SIGN 如图 6 所示。

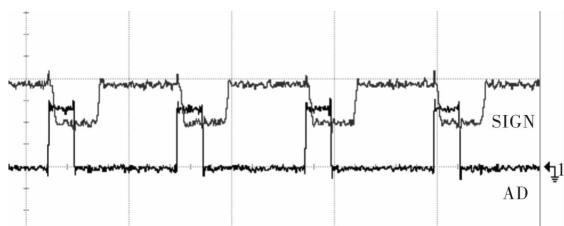


图 6 A/D 转换触发信号与输出信号

Fig. 6 A/D trigger and output signal

3 光谱辐射测量系统

光谱辐射测量系统由辐射测量探测器电路系统、平场凹面光栅、入射狭缝、光纤等部分组成, 如图 7 所示。其中辐射测量探测器电路系统为上述设计的结果, 平场凹面光栅集分光、汇聚、像差校正于一体^[11], 用于将入射狭缝的光色散并汇聚到

探测器焦平面上。该设计方法最大化减少了光电器件数量, 并具备性能保障, 保证了系统在野外工作的可靠性和稳定性。

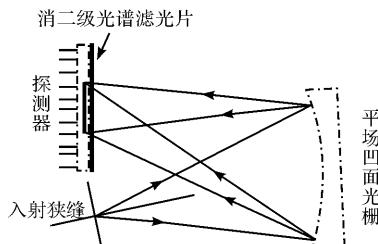


图 7 分光探测结构图

Fig. 7 Structure of splitting detection

4 辐射采集系统测量分析与应用

4.1 系统观测与性能分析

整个辐射采集系统设计完成后, 进行了简单的场景模型测试, 如图 8 所示, 测量实验设计场景为探测器在部分遮挡下系统检测光谱数据。当线阵探测器经过以上电路处理后可得到理想的数字信号输出, 可通过 CAN 通信发送到上位机进行分析处理。

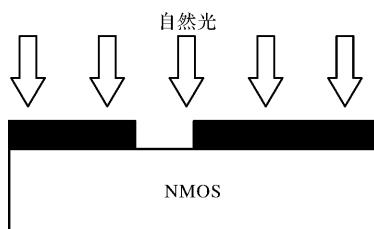


图 8 实验模型图

Fig. 8 Experimental model

图 9 为上位机接收到的探测器采集的输出波形图, 从图中可以看出, 输出波形为透光区域的探测器像元采集到的光信号, 这与本设计的预期符

合。但遮光区域边缘漏光,造成系统采集的光谱在遮光边缘处谱线缓慢的上升或下降。

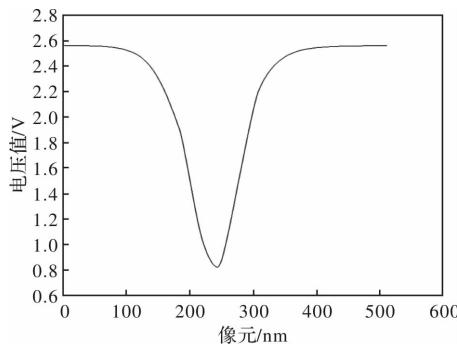


图 9 上位机接收的输出波形图

Fig. 9 Output waveform of upper computer reception

整个辐射采集系统是利用微处理器 STM32 内部 12 位的 ADC 完成采集,它的参考电压为 3.3 V。整个系统在完全遮挡的测量场景下进行工作,所有像元之间的电压偏差如图 10 所示,可看出系统的量化误差为 1 LSB,约为 0.8 mV。

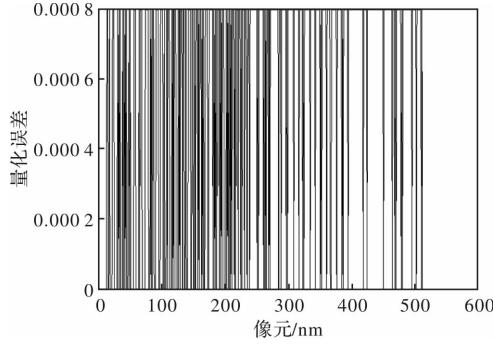


图 10 探测器采集的量化误差

Fig. 10 Quantization error acquired by detector

4.2 光谱采集系统应用

为了实现光谱采集系统的野外应用与比对,在实验室进行基于中国计量院标准灯的辐照度响应度定标,以标准灯标准辐照度值和辐照度测量电压值的比值作为光谱采集系统的定标系数^[12]。定标完成后选择晴朗日对辐射测量系统进行野外测量实验,并与 MODTRAN^[13-14] 模拟数据进行对比。其中辐射测量系统采用积分球进行总照度直接观测,MODTRAN 的结果采用实时的经纬度、时间、大气光学厚度等条件进行模拟,最终的比对结果如图 11 所示。由图中可看出,两者得到的地面光谱辐照度趋势一致,验证了辐射测量系统的设计原理和系统定标方法的正确性。将光谱采集系统的总照度观测结果 $E_{VNIR}(\lambda)$ 与 MODTRAN 的模拟结果 $E_{MODTRAN}(\lambda)$ 进行比对计算,计算方法

如(2)式所示,最终两者的总照度存在 5% 的相对偏差,考虑到理论模型中水汽、臭氧等参数^[15]采用理论输入结果,与环境的实际值有差异,引起总照度的偏差。为了进一步验证总照度比对偏差,首先进行理论模拟中的水汽、臭氧等参数的现场测量,获得实测参数的大气总照度模拟数据,其次采用另外的野外光谱仪器进行同步比对测试,验证光谱采集系统的最终观测结果。

$$R(\lambda) = \frac{E_{VNIR}(\lambda) - E_{MODTRAN}(\lambda)}{E_{VNIR}(\lambda)} \times 100\% \quad (2)$$

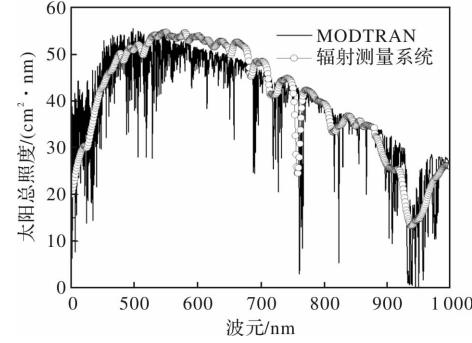


图 11 太阳光谱总照度对比

Fig. 11 Total illuminance comparison of solar spectrum

5 结论

为满足卫星遥感器在轨场地定标的野外观测仪器的应用需求,本文完成了可见近红外波段的光谱辐射测量系统的设计,并给出了其应用与分析。选用高性能的线阵传感器,分析驱动时序的需求并进行了设计。获得探测器的模拟输出信号后,对信号进行预处理和信号采集,得到了可见近红外波段的辐射信号测量结果。通过对辐射测量系统进行验证与分析,电路系统的数据采集精度小于 0.8 mV,光谱辐射采集系统的野外总照度测量的比对结果小于 5.0%。整个系统实现了可见近红外波段的光谱数据测量,并通过试验和系统应用进行了验证,可以直接应用于野外光谱观测仪器中。

参考文献:

- [1] QIAO Yanli, ZHENG Xiaobing, WANG Xianhua, et al. Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors[J]. Journal of Remote Sensing, 2006 (5): 616-623.

乔延利,郑小兵,王先华,等. 卫星光学传感器全过程

- 辐射定标[J]. 遥感学报, 2006(5):616-623.
- [2] GU Hangfa, TIAN Guoliang, YU Tao, et al. Principle and method of radiometric calibration for space optical remote sensor [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- 顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [3] PAN Yan, LI Xin, ZHAI Wenchao, et al. Opto-mechanical design of a spectrally-continuous radiometer for surface reflectance automation observation [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6):33-43.
- 潘琰, 李新, 翟文超, 等. 连续光谱地表反射特性自动观测辐射计的光机设计[J]. 光子学报, 2018, 47(6):33-43.
- [4] XIE Yinzhen, ZHUANG Songlin, ZHANG Baozhou. Research on calibration of spectrometers based on linear CCD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3):546-550.
- 谢印忠, 庄松林, 张保洲. 基于线阵 CCD 的光谱仪定标研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3):546-550.
- [5] HAMAMASTU. NMOS linear image sensor S3021/3924 series [EB/OL]. [2018-10-23]. <http://www.hamamatsu.com.cn>.
- [6] ZHANG Xikang, ZHENG Zhizhong, XIU Liancun, et al. Driving and sampling technology of high performance photoelectrical NMOS array detector in the application of spectral measurement [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2009, 32(1):77-81.
- 张熙康, 郑志忠, 修连存, 等. 一种应用于光谱测量的高性能光电 NMOS 阵列探测器的驱动与采集[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(1):77-81.
- [7] WU Dongyang, SU Ning, ZHANG Zhengyong. Implementation and performance analysis of a specified number of PWM waves based on STM32 output[J]. Instrumentation Technology, 2018(7):10-13.
- 吴东洋, 宿宁, 张正勇. 基于 STM32 输出指定个数 PWM 波的实现和性能分析[J]. 仪表技术, 2018(7):10-13.
- [8] LI Dapeng, CAO Guohua, CHEN Jiyan. Research on imaging system based on STM micro-controller unit [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2014, 37(1):37-40.
- 李大朋, 曹国华, 陈佶言. 基于 STM32 单片机驱动面阵 CCD 实时图像显示的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(1):37-40.
- [9] ANALOG DEVICES. JFET input instrumentation amplifier with rail-to-rail output in MSOP package AD8220 [EB/OL]. [2018-10-24]. <http://www.analog.com>.
- [10] WANG Yilei, GAO Pengfei, HUANG Fei, et al. Design of the spectrum acquisition system based on STM32[J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30(2):1-3.
- 王毅磊, 高鹏飞, 黄斐, 等. 基于 STM32 的光谱采集系统设计[J]. 电子科技, 2017, 30(2):1-3.
- [11] LI Xin, ZHENG Xiaobing, HONG Jin, et al. Optical and mechanical design of SWIR hyperspectral field spectroradiometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2007(11):1656-1661.
- 李新, 郑小兵, 洪津, 等. 高光谱短波红外地物光谱仪的光机设计[J]. 光学精密工程, 2007(11):1656-1661.
- [12] ZHANG Yanna, LIU Enchao, LI Xin, et al. Calibration method of VNIR solar irradiance spectroradiometer[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1):11-16.
- 张艳娜, 刘恩超, 李新, 等. 可见-近红外波段太阳光谱辐照度仪的辐射定标方法研究[J]. 应用光学, 2014, 35(1):11-16.
- [13] ZHENG Wei, ZENG Zhiyuan. A review on methods of atmospheric correction for remote sensing images [J]. Remote Sensing Information, 2004(4):66-70.
- 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正方法综述[J]. 遥感信息, 2004(4):66-70.
- [14] GAO Shupeng, HE Ping. Comparative study on atmospheric correction radiative transfer model of common remote sensing images[J]. Advances in Geosciences, 2018, 8(1):1-8.
- 高书鹏, 和萍. 常用遥感影像大气校正辐射传输模型对比研究[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(1):1-8.
- [15] MAO Kebiao, QIN Zhihao. The transmission model of atmospheric radiation and the computation of transmittance of MODTRAN[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2004(4):1-3.
- 毛克彪, 覃志豪. 大气辐射传输模型及 MODTRAN 中透过率计算[J]. 测绘与空间地理信息, 2004(4):1-3.