

星载多光谱相机成像系统设计与实现

叶松¹, 于新宇^{1,2,3}, 甘戈^{2,3**}, 李扬^{2,3}, 邹征宇^{2,3}, 路美娜^{2,3}, 骆冬根^{2,3*}, 裘桢炜^{2,3***}¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;²中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;³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

摘要 针对卫星上相机对高信噪比、抗辐照等特殊要求,提出一种基于长光辰芯公司的科学级 CMOS 探测器 HR400 的多光谱相机成像电子学系统设计,采用 FPGA 加 SRAM 缓存的系统架构,重点讨论了 CMOS 探测器的驱动设计和图像采集技术。首先,针对滤光片轮式多光谱相机曝光时间变化会导致成像偏振方位角差异的问题,提出一种能够根据曝光时间动态调整的延时成像方法,将通道通光中心作为成像的采集中心,保证不同曝光时间下采集的图像中心位置一致且处于最佳采样位置;然后,针对该延时成像方法的成像中心位置误差进行分析;最后,对相机成像性能和不同曝光时间的偏振方位角进行测试验证。测试结果表明:成像系统的时域暗噪声为 71.6(等效电子数),当系统光强为饱和光强的 80% 时,信噪比为 588.1,满足载荷成像要求;延时成像方法对由曝光时间导致的偏振方位角差异有明显改善。

关键词 成像系统;多光谱相机;CMOS;卫星成像;信噪比

中图分类号 TP73

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230476

1 引言

大气中的水汽、气溶胶等成分对太阳辐射有较强的散射和吸收作用,在星载遥感相机成像过程中可产生较大的影响。星载光学遥感器接收的地物目标信息受到大气的干扰,特别是临地球盘面边缘观测受到的影响更大,使得高分辨率卫星遥感图像出现模糊,图像质量严重下降,且影响到图像的定量化解译水平。大气参数探测载荷可对同平台遥感相机图像进行大气校正,减弱大气对图像的干扰,能够有效提高图像质量。随着高分辨率遥感应用技术的不断发展,大气参数探测载荷已成为高分辨率光学卫星传感器的重要配置^[1]。

光谱信息被广泛用于物质识别,在遥感领域有重要应用^[2]。某大气校正仪通过多光谱偏振成像^[3-4],获得同平台星载光学遥感相机同时刻、同区域的大气参数,并通过大气辐射传输计算对遥感图像进行大气校正,有效提升了遥感图像质量^[5]。星载多光谱探测系统大多采用独立的分光器件和探测器^[2]。大动态范围、低噪声的探测器是探测仪的关键组成元件之一,在光谱成像领域,性能优良的 CCD 探测器一直是首选^[6]。但是 CCD 探测器的外围电路复杂,对驱动信号及模拟信号采集要求高,导致焦平面电路系统庞杂,硬

件体积、质量较大,功耗均较高^[7]。相比之下,互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器的集成度高,外围电路简单,可明显降低焦平面电路的复杂度,利于系统小型化,同时具备成本低、功耗低的优势^[8]。随着技术的发展和进步,CMOS 探测器在量子效率、噪声水平及动态范围等关键性能参数上已能够与 CCD 媲美,有逐步取代 CCD 探测器的趋势^[9]。

目前,国外垄断着高端 CMOS 器件和相机的研发技术,这对我国航天事业的发展造成了阻碍,因此我们需要积极研发和搭载国产 CMOS 图像传感器,打破国外垄断,填补国产大面阵、高帧频 CMOS 探测器在航天光谱成像领域的空白^[10]。本文基于长光辰芯公司的科学级 CMOS 探测器 HR400,针对某校正仪项目的多光谱成像需求,设计了一套具有高可靠性、高信噪比的 CMOS 成像电子学系统,并针对其滤光片轮式成像特点,提出一种动态延时成像方法,解决了由曝光时间变化导致的偏振方位角偏差问题,为同类仪器设计提供参考。

2 系统总体设计

CMOS 成像电子学系统需要根据相机在轨工作的成像模式及成像条件实现参数调整,在偏振滤光组件转动到相应光谱通道后控制 CMOS 成像,并对

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-02-22; 录用日期: 2023-03-12; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(30-Y20A19-9007-15/17)

通信作者: *dgluo@aiofm.ac.cn; **1005816654@qq.com; ***zwqiu@aiofm.ac.cn

CMOS 图像数据进行高速的实时采集、预处理及存储,在给定时间内完成图像传输。为了满足上述需求,CMOS 成像电子学系统以图像传感器为核心,以现场可编程逻辑门阵列(FPGA)为主控单元。将电子学系统的设计分为焦平面模块、主控模块、存储模块、通信与数传模块及电源模块。各电路模块、FPGA 内部架构和数据流如图 1 所示。

焦平面模块由 CMOS 图像传感器和去耦电容组成,安装在镜头后方,与电路主板间采用柔性电路板(FPC)连接。主控模块由 FPGA 及其配置电路组成,是系统的控制核心。其中,FPGA 需要接收探测器输入的高速图像数据,并对输入数据的延时进行动态精细调整,以同步 8 条低压差分信号(LVDS)通道的信息。当前国内民用航天领域选用的大规模可编程逻辑器件多来自 Xilinx 公司的 Virtex 系列,但只有 Virtex-4 系列以上才提供输入延时可动态调整的功能^[11]。因此,本实验的 FPGA 选用北京微电子技术研究所生产的 BQR5VSX95T,其能够与 Virtex-5 系列 XQ5VSX95T 完全兼容。配置电路由刷新芯片和 PROM 组成,用于 FPGA 上电加载程序及在轨工作发生单粒子翻转时进行动态刷新,以保证系统正常工作。存储模块选用北京

微电子技术研究所研发的 16 Mbit 抗辐照静态随机存取存储器(SRAM),型号为 B8CR512K32RH。该 SRAM 为异步操作存储器,不需要外接时钟,具有容量大、抗辐照加固、数据存取时间快等特点,具有较强的抗辐照能力,SRAM 保证了图像能够以满足数据传输协议要求的速率读出。电源模块对输入电压进行滤波和电压变换,为 FPGA 等电路提供所需的电源,同时为 CMOS 提供低噪声的直流偏置电压。通信与数传模块包括 RS422 和 LVDS 的接口芯片,负责电路接口电平的转换。

成像系统的工作流程如下:FPGA 上电加载配置程序,通过 RS-422 接口接收信息处理单元发送的指令与参数;FPGA 的成像控制模块对接收的信息进行判断和应答,并将接收的探测器配置参数通过 SPI 接口对 CMOS 探测器的内部寄存器进行配置,并将曝光时间等参数发送给探测器驱动模块;在接收到成像指令后,探测器驱动模块产生驱动时序,驱动 CMOS 探测器成像;探测器正常工作时,数字图像数据通过 8 路 LVDS 发送到 FPGA 的数据采集和存储模块进行接收并缓存至 SRAM;在完成一帧图像的存储后,FPGA 从 SRAM 中读取缓存的图像数据打包后,通过 LVDS 接口发送给信息处理单元。

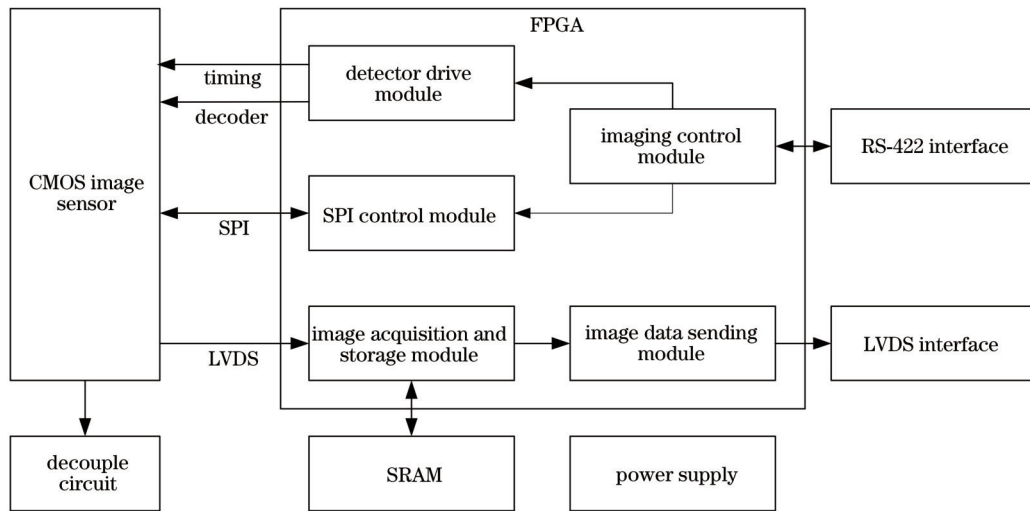


图 1 成像电子学系统框图

Fig. 1 Block diagram of imaging system

3 CMOS 相机成像技术分析

卫星所处空间环境恶劣,故对 CMOS 图像传感器抗辐照能力的要求较高。选用长光辰芯的背照式 CMOS 探测器 HR400,其辐照总剂量大于 500 Gy (Si),抗单粒子锁定大于 $75 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$,且经过航天飞行验证,可满足载荷使用要求。HR400 具有高速、低噪声、高灵敏度以及大动态范围等特点,分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,可灵活选择开窗区域,采用卷帘快门,单个像元尺寸为 $11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$,在内部集成 12 位 ADC。本文将结合多光谱相机成像特点和探

测器卷帘快门的工作原理,对延时成像方法、探测器的驱动时序和图像采集方法展开设计。

3.1 多光谱成像位置影响分析

相机采用滤光片转轮分光的方式进行多光谱成像,其偏振滤光组件均匀分布着 13 条光谱通道,安装有滤光片、偏振片等,通过步进电机切换滤光片来获取不同谱段的信息。载荷在轨工作时,偏振滤光组件全程保持匀速转动,在转动到对应的光谱通道后,向成像系统发送入光点同步信号以启动探测器成像。图像曝光过程中由于偏振片保持旋转,偏振片的检偏角度不断变化。如图 2 所示,若在收到入光点信号后立即启

动成像,曝光时间越长,曝光过程中偏振片转动的角度越大,整个成像过程的平均偏振方位角表示为曝光过程中心位置的角度。因此,两个曝光时间的成像中心存在偏差角 α 。同时,由于滤光片的不均匀性,滤光片中心的均匀性优于边缘处,当曝光时间较短时,在滤光片转动到光轴中心前就已完成成像,成像结果易受到滤光片边缘处不均匀的影响。实际成像对应的电机角度位置可表示为

$$P_{\text{frame}} = P_{\text{entry}} + \frac{\omega T_{\text{frame}}}{2}, \quad (1)$$

式中: P_{entry} 为入光点处的电机角度位置; ω 为电机转速; T_{frame} 为一帧图像的采集周期。入光点处的电机角度位置 P_{entry} 和电机转速 ω 为固定值,一帧图像的采集周期 T_{frame} 与曝光时间线性相关,因此实际成像电机的角度位置随曝光时间变化,曝光时间差异越大,实际成像的偏振方位角差异就越大。

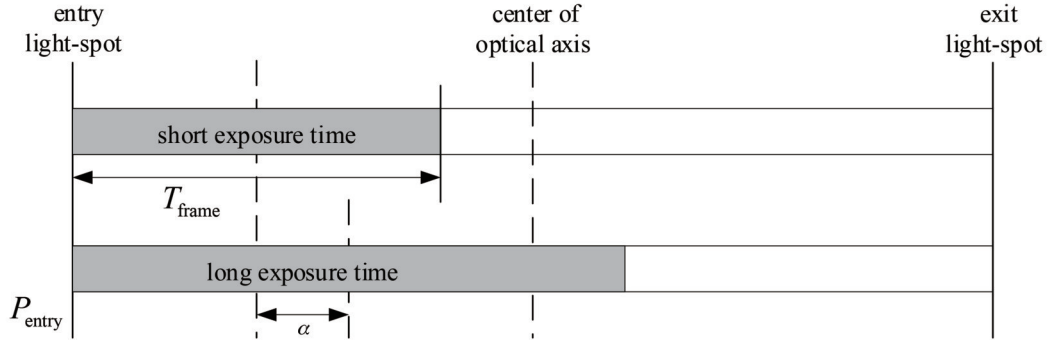


图 2 长短曝光时间成像位置示意图

Fig. 2 Imaging position diagram of long and short exposure time

3.2 驱动时序设计

HR400 正常工作时需要使用 20 个外部时序控制信号,全部由 FPGA 产生。控制信号的周期为一个行周期,即包含 513 个像素时钟周期^[12]。编码器和时序信号需要同时工作,在同一个行周期内,FPGA 需要同

时产生控制信号和编码器地址信号,控制信号与编码器地址的关系如图 3 所示。当探测器正常工作时,每一个行周期的控制信号为固定时序,但编码器地址需要根据图像开窗的位置和大小、曝光时间等实际需求设计。

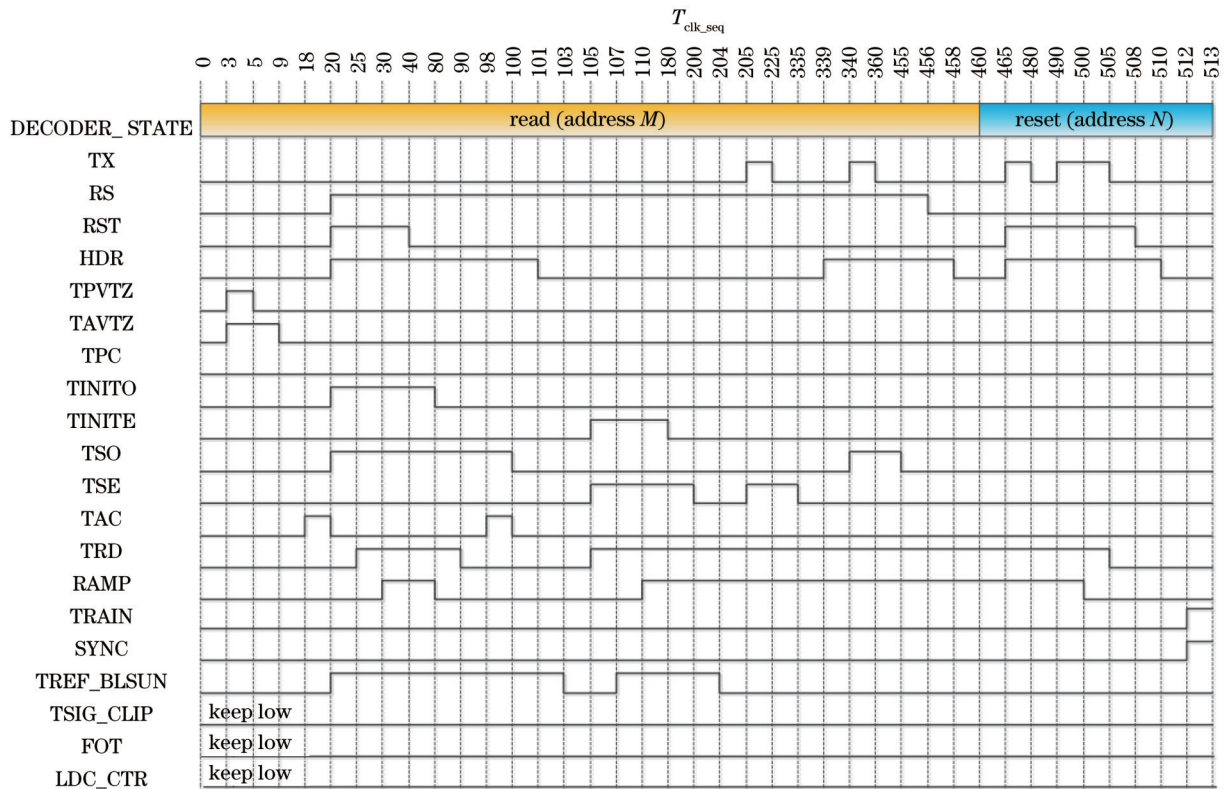


图 3 HR400 控制信号和编码器时序图

Fig. 3 Control signal and encoder sequence diagram of HR400

HR400 探测器采用电子卷帘式快门, 卷帘式快门的曝光过程如图 4 所示。编码器的地址在一个行周期内分为两个阶段: 读取阶段 (read phase) 和复位阶段 (reset phase)。在同一个行周期内, 读取阶段总是出现在复位阶段之前。在芯片操作过程中, 复位一行等效于这一行曝光开始, 读取一行等效于这一行曝光结束。行复位与行读取的间隔为成像的曝光时间。曝光时间计算公式为

$$T_{\text{exp}} = n \times T_{\text{line}} + T_{\text{RES}}, \quad (2)$$

$$T_{\text{line}} = 513 \times T_{\text{clk_seq}}, \quad (3)$$

式中: n 为行周期的倍数; T_{line} 为行周期; $T_{\text{clk_seq}}$ 为像素时钟的周期; T_{RES} 为时间余量。

为简化曝光时间描述, 可以忽略时间余量, 将曝光时间描述成行周期的整数倍。当对探测器选取 k 行 (行地址范围为 x 到 $x+k-1$) 进行曝光成像时, 可以将

成像过程等效为一个 n 行的曝光窗口对探测器行地址 x 到 $x+k-1$ 进行逐行扫描。

当曝光时间 n 小于所选行数量 k 时, 成像过程如图 4(a) 所示。首先对行地址 x 进行复位, 此时读取地址 (read) 位于成像区域范围外, 在所选区域第一行曝光结束之前读取操作是没有实际意义的, 此时读取阶段的地址选择虚拟地址 (dummy)。当读取地址为 x 时, 第 x 行的曝光结束, 探测器开始进行数据输出, 此时复位地址 (reset) 为 $x+n+1$, 未超出成像区域范围。随着积分窗口向下扫描, 复位地址到达成像区域最后一行 $x+k-1$, 此时成像区域均已进入曝光或读出状态, 之后复位地址重置为 x , 进入第 2 帧图像的曝光。当读取地址到达 $x+k-1$ 时, 探测器最后一行数据读出, 至此对第 1 帧图像的成像结束。当需要连续成像时, 将读取地址重置为 x 后进入第 2 帧图像的读出循环。

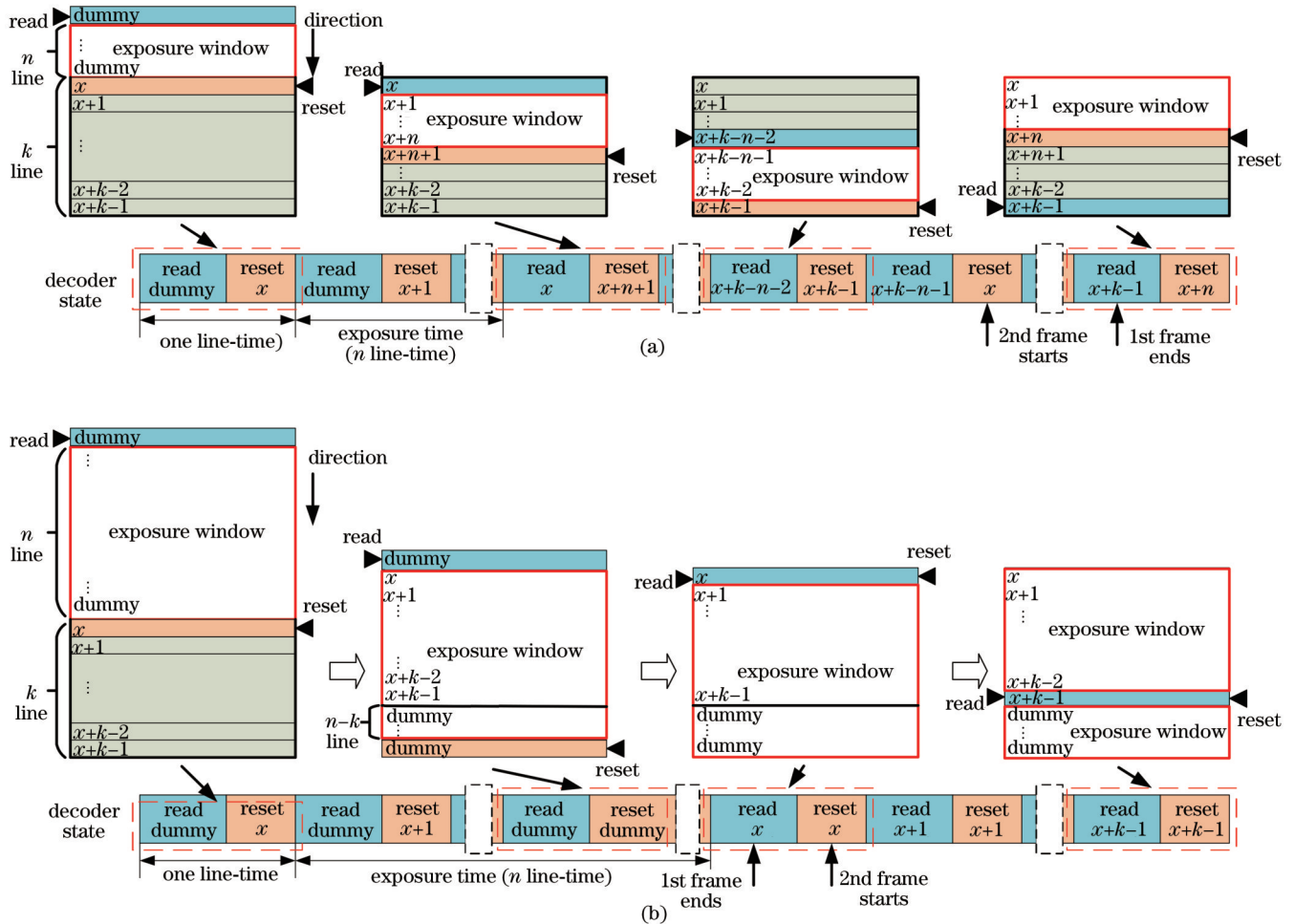


图 4 成像曝光过程示意图。(a) $n < k$; (b) $n \geq k$

Fig. 4 Diagrams of the imaging exposure process. (a) $n < k$; (b) $n \geq k$

当曝光时间 n 大于或等于所选行数量 k 时, 成像过程如图 4(b) 所示。首先仍对行地址 x 进行复位, 此时读取地址选择虚拟地址, 虚拟地址为物理意义上并不存在的像素行, HR400 中的虚拟地址为 4000。随着曝光窗口向下扫描, 地址 $x+k-1$ 完成复位后, 成像区域

的首行地址 x 仍处于曝光状态, 复位地址需插入虚拟地址来增加曝光时间, 此时读写地址均为虚拟地址。当读取地址为 x 时, 为了获得最大的帧频, 完成读取后, 应当立刻开始这一行第 2 帧图像的曝光, 复位地址重置为 x 。此后, 同一行周期内, 有效行 (非虚拟行) 的

读取地址与复位地址相等,直至完成对 $x+k-1$ 行的读取后,对第 1 帧图像的成像结束。

根据载荷工作要求,探测器的成像区域选取中心区域的行数量 $k=534$ 行(地址范围从 757 到 1290)。曝光时间 $n=2$ 的时序仿真结果如图 5(a) 所示,在读取

某行时,读取地址和复位地址满足 x 与 $x+n+1$ 的关系。曝光时间 $n=537$ 的时序仿真结果如图 5(b) 所示,读取某行时,读取地址和复位地址相同。时序仿真结果符合时序设计预期。

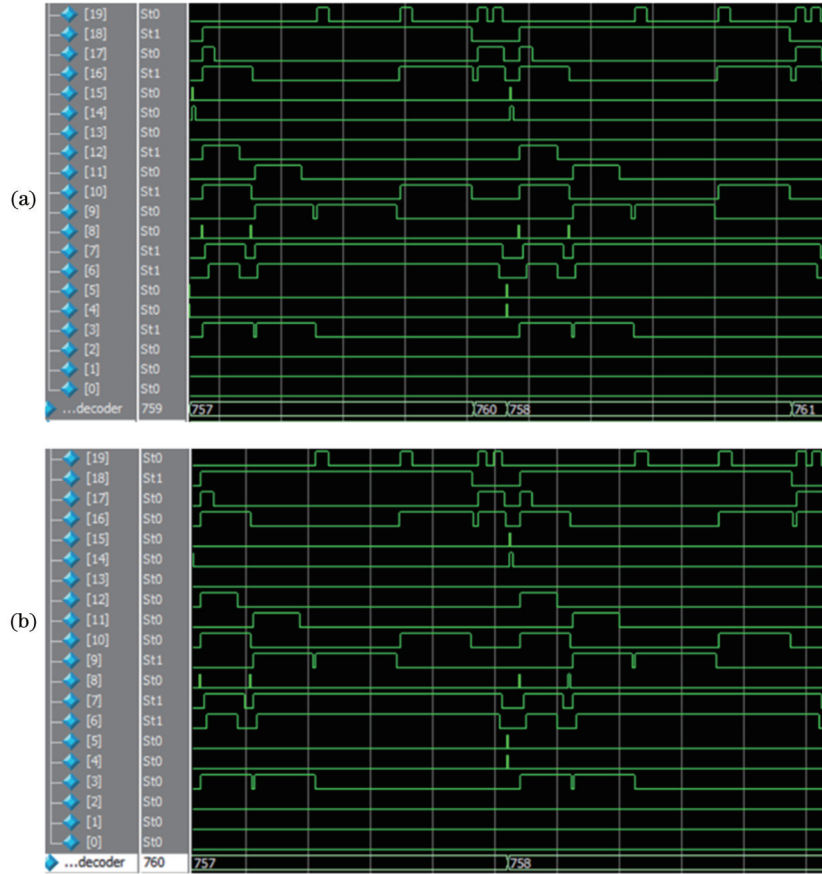


图 5 不同曝光时间下的驱动时序仿真结果。(a) $n=2$; (b) $n=537$
 Fig. 5 Drive timing simulation results under different exposure time. (a) $n=2$; (b) $n=537$

3.3 动态延时成像设计

当收到入光点信号后,在成像前添加一段延时补偿,如图 6 所示。实际成像对应的电机角度位置可表示为

$$P_{\text{frame}} = P_{\text{entry}} + \omega T_{\text{delay}} + \frac{\omega T_{\text{frame}}}{2}, \quad (4)$$

式中: T_{delay} 为延时补偿。若能保证延时补偿能够根据曝光时间动态调整,即可保证在不同曝光时间下成像中心均能对齐光轴中心,成像时的偏振方位角在不同曝光时间下均保持一致。

实际成像时每条光谱通道的入光时间有限,成像系统需要在有限的时间内完成曝光,因此曝光时间的

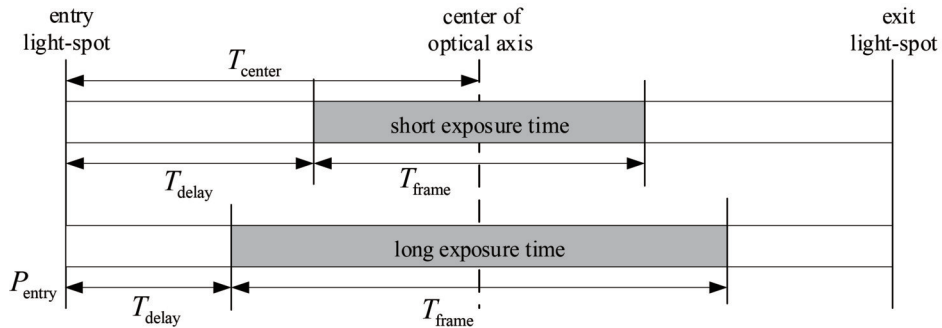


图 6 添加延时补偿的长短曝光时间成像位置示意图
 Fig. 6 Imaging position diagram of long and short exposure time with delay compensation

设置不能过大,否则图像将会产生遮挡或错过下一条通道的入光点同步信号。

经过测试,相机每条光谱通道的有效入光时间为 120 ms,入光点同步信号在滤光片中心到达通光中心前的 60 ms 处发送。成像系统在收到入光点信号后根据曝光时间添加动态延时,将通道通光中心作为各曝光时间的采集中心,添加的动态延时计算公式为

$$T_{\text{delay}} = T_{\text{center}} - T_{\text{frame}}/2, \quad (5)$$

$$T_{\text{frame}} = (n + k + 1) \times T_{\text{line}}, \quad (6)$$

式中: T_{center} 为入光点至通光中心的时间间隔; T_{line} 为行周期; n 为曝光时间对应的行数量; k 为所选行数量。

成像时根据上述公式计算各通道成像时的延时。当曝光时间为 1 ms($n < k$)时,延时仿真结果如图 7(a)所示;当曝光时间为 20 ms($n > k$)时,延时仿真结果如图 7(b)所示。由仿真结果可知,两种曝光时间下,成像系统收到入光点同步信号距成像曝光中心的时间均为 60 ms,位于通道中心的最佳采样位置,与设计预期一致。

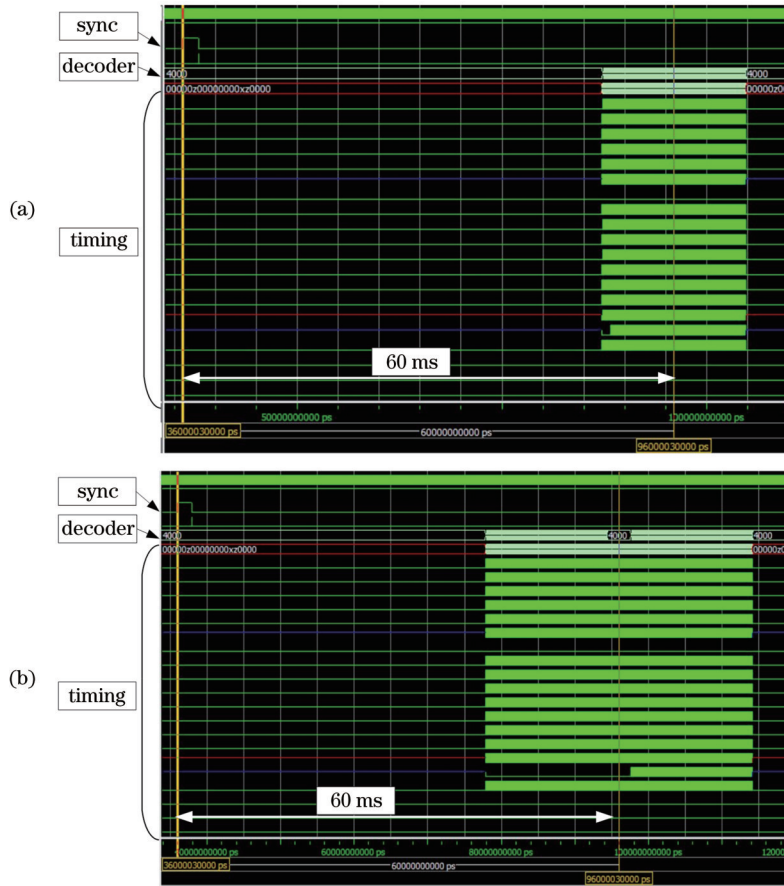


图 7 不同曝光时间下动态延时的时序仿真结果。(a) $n=1$ ms;(b) $n=20$ ms

Fig. 7 Dynamic delay time sequence simulation results under different exposure time. (a) $n=1$ ms; (b) $n=20$ ms

3.4 图像数据采集和处理

HR400 采用源同步 LVDS 接口技术来传输高速图像数据,其中包括 8 条 LVDS 数据通道和 1 条时钟(DDR 源同步时钟)通道^[12]。数据的采集和存储由 FPGA 数据处理模块完成,包括数据采集单元、数据存储单元和数据发送单元,采用 Verilog 硬件描述语言设计。数据处理流程如图 8 所示。

在数据采集单元中,探测器输入的差分数据信号通过 IBUFDS 原语转换为单端信号,之后依次通过 FPGA 内置的 IODELAY 原语实现动态延时调节,通过 ISERDES 模块实现串并转换及数据移位,通过移位寄存器(shift register)实现并行数据的输出延时,通过校正模块(LVDS training)实现 LVDS 校正,最后将

数据写入随机块存储器(BRAM)。在数据传输时,由于探测器本身各通道不匹配及 PCB 布线路径不同等,各通道数据到达接收端的时间不同步,容易产生图像数据错误^[11]。为了确保高速数据能够被正确采样,在接收图像数据前,由校正模块(LVDS training)对数据进行位对齐、字对齐和通道对齐。FPGA 控制探测器连续输出一组已知的固定数据 training pattern,校正模块向 IODELAY 发送使能信号 CE 来逐步增加延时,使采样点处于稳定数据的中心,完成位对齐。当校正模块接收到的数据与 training pattern 不同时,向 ISERDES 模块发送移位信号 bitslip,直至接收数据与 training pattern 相同,完成字对齐。为避免各通道数据不在同一时刻读出,通过移位信号 shift 控制移位寄存器

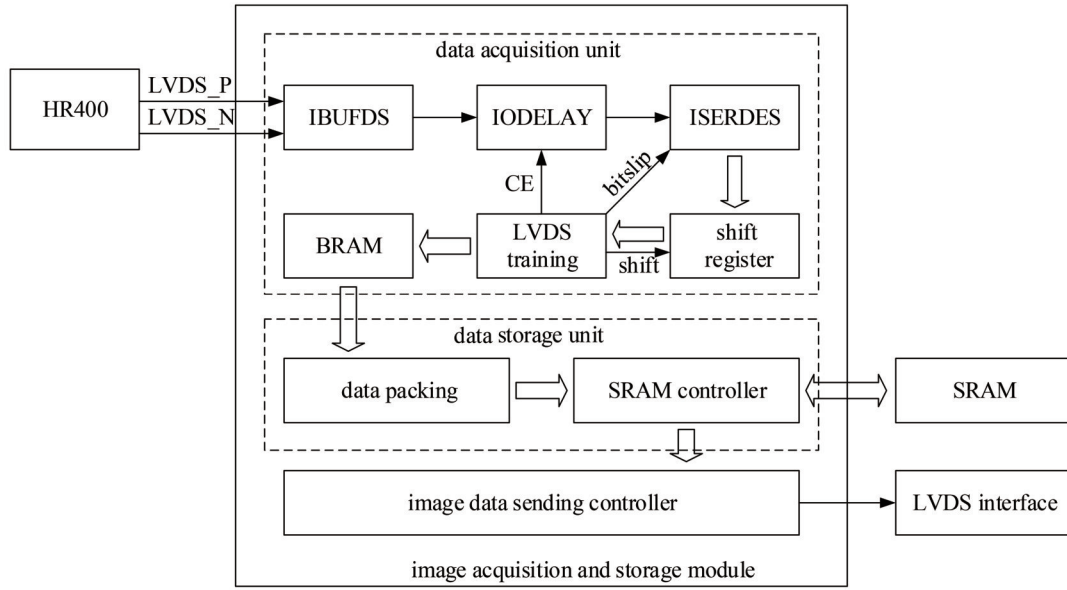


图 8 图像采集与存储模块框图

Fig. 8 Block diagram of image acquisition and storage module

移位,完成通道对齐。

BRAM中的数据可以按照图像列大小选择所需的地址进行读出,将读出的数据打包后通过SRAM控制模块写入外部SRAM芯片中缓存。数据打包处理时,采用 2×2 binning处理,将相邻 2×2 像元的灰度值叠加,获得具有更高信噪比的图像。由于采用4个临近灰度值进行数字叠加,直接将叠加后的灰度值作为输出结果,信号值变为原始图像的4倍,时域暗噪声变为原始图像的2倍,等效信噪比提升至原始图像的2倍^[7]。

4 延时成像误差分析

添加动态延时补偿后,不同曝光时间下的图像成像中心位置一致,均位于通道通光中心,实际成像对应的电机角度位置可化简为

$$P_{\text{frame}} = P_{\text{entry}} + \omega T_{\text{center}}, \quad (7)$$

式中: T_{center} 为入光点至通光中心的时间间隔。

在不考虑偏振方位角测试时图像信噪比和测量误差影响的情况下,实际成像时电机的角度位置为固定值,其主要误差来源是式(7)的参数 P_{entry} 、 ω 、 T_{center} 。成像时电机的角度位置误差可以表示为

$$\delta P_{\text{frame}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial P_{\text{frame}}}{\partial P_{\text{entry}}}\right)^2 (\delta P_{\text{entry}})^2 + \left(\frac{\partial P_{\text{frame}}}{\partial \omega}\right)^2 (\delta \omega)^2 + \left(\frac{\partial P_{\text{frame}}}{\partial T_{\text{center}}}\right)^2 (\delta T_{\text{center}})^2}, \quad (8)$$

式中: δP_{frame} 为成像时电机角度位置误差; $\frac{\partial P_{\text{frame}}}{\partial P_{\text{entry}}}$ 、 $\frac{\partial P_{\text{frame}}}{\partial \omega}$ 、 $\frac{\partial P_{\text{frame}}}{\partial T_{\text{center}}}$ 分别为电机角度位置误差对3个误差源的偏导数; δP_{entry} 为步进电机在入光点处的角度误差; $\delta \omega$ 为电机转速误差; δT_{center} 为计时误差。

各误差源的误差大小见表1,成像位置误差与入光点处的角度误差有关,与入光点处的角度位置无关,因此在表1中不作讨论。入光点处的角度误差通过多次测量电机运动到固定步数处的编码器角度获得;电机转速误差通过测量转动周期得到;计时误差受FPGA时钟稳定性影响,其误差按照频率稳定性 20×10^{-6} 计算。通过式(8)计算可知,添加延时补偿后成像中心位置处的角度误差主要受电机固定位置处的角度误差影响,其他误差源的影响可忽略不计,误差约为

$\pm 0.087^\circ$ 。

表1 主要参数误差

Parameter	Parameter value	Error value
P_{entry}	—	$\delta P_{\text{entry}} = \pm 0.087^\circ$
ω	73.245 ($^\circ$)/s	$\delta \omega = \pm 0.03$ ($^\circ$)/s
T_{center}	60 ms	$\delta T_{\text{center}} = \pm 0.0012$ ms

5 系统性能测试与分析

根据上述设计完成了星载CMOS成像电子学系统的设计与软硬件调试,与光学系统组装后完成相机的整体设计。为了验证相机的成像质量和动态延时成像方法对偏振方位角的改善情况,在室温下对其成像性能和偏振方位角进行测试验证。

5.1 暗噪声和信噪比测试

图 9 为性能测试系统框图,该系统的器件主要包括积分球、光谱辐亮度计(ASD)、地检计算机(PC)、多光谱相机,其中积分球为相机提供均匀稳定且能量可

调的面光源,ASD用于测量相机入瞳处的光谱辐亮度值^[13]。测试时将相机和ASD正对积分球口中心,使积分球出射光充满相机视场^[14]。测试现场如图 10 所示。

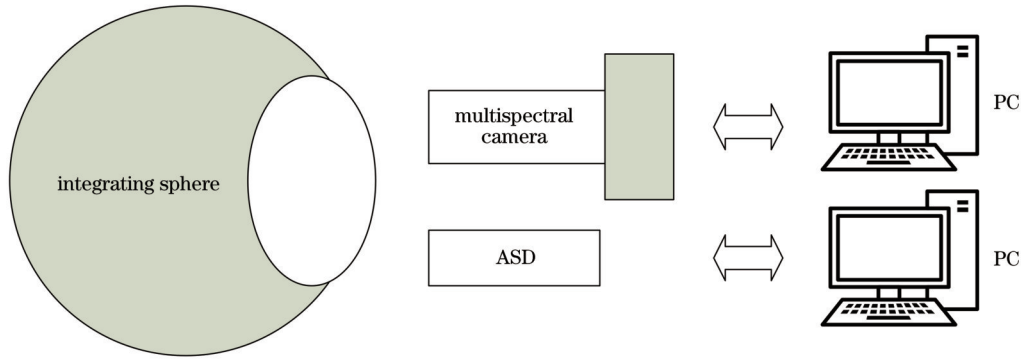


图 9 性能测试框图

Fig. 9 Block diagram of performance test

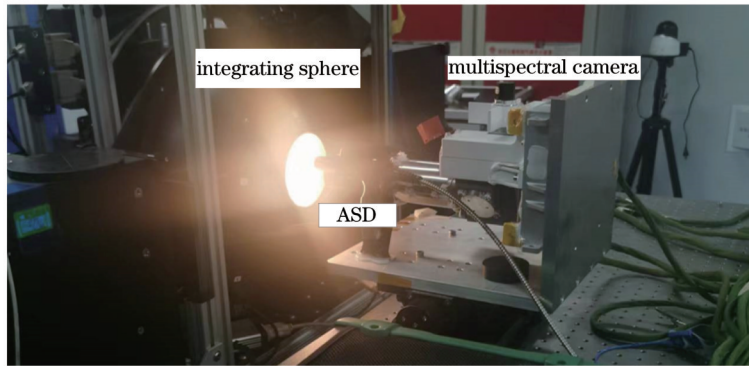


图 10 性能测试现场

Fig. 10 Performance test site

1) 时域暗噪声测试

暗场条件下,取最短曝光时间的 20 帧图像数据来计算时域暗噪声^[15]。单个像元的时域暗噪声计算公式为

$$D_{\text{noise}, T, i, j} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^A (D_{\text{dark}, T, i, j, m} - Y_{\text{dark}, T, i, j})^2}{A}}, \quad (9)$$

$$Y_{\text{dark}, T, i, j} = \frac{1}{A} \sum_{m=1}^A D_{\text{dark}, T, i, j, m}, \quad (10)$$

式中: $D_{\text{dark}, T, i, j, m}$ 为曝光时间 T 时图像第 i 行、第 j 列像元第 m 次测量的亮暗场灰度值; $Y_{\text{dark}, T, i, j}$ 为对应单个像元的暗场灰度均值; A 为测量次数。

通过计算得到,像元合并后输出图像的时域暗噪声为 3.51,等效电子数为 71.6,约为 HR400 型 CMOS 图像传感器数据手册中提供的单像元时域暗噪声典型值 37.2 的 2 倍,与理论分析结果一致。可见,所设计电路系统引入的噪声很小,具有良好的性能。

2) 信噪比测试

使用 ASD 监测积分球输出信号,待其输出信号值稳定后,对积分球进行图像采集,各波段多光谱成像结

果如图 11 所示。选取 670 nm 波段进行不同曝光时间的信噪比计算,每次采集 20 帧图像。信号质量由信噪比描述,成像系统的信号值和噪声由扣除暗场信号的图像灰度均值 $Y_{T, i, j}$ 和标准差 $S_{\text{noise}, T, i, j}$ 表征^[16]。信噪比的计算公式为

$$R_{\text{SN}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{Y_{T, i, j}}{S_{\text{noise}, T, i, j}}, \quad (11)$$

$$Y_{T, i, j} = \frac{1}{A} \left[\sum_{m=1}^A (D_{T, i, j, m} - Y_{\text{dark}, T, i, j}) \right], \quad (12)$$

$$S_{\text{noise}, T, i, j} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^A (D_{T, i, j, m} - Y_{\text{dark}, T, i, j} - Y_{T, i, j})^2}{A}}, \quad (13)$$

式中: $M \times N$ 为选取的计算区域的像素矩阵大小; $D_{T, i, j, m}$ 表示曝光时间为 T 时图像第 i 行、第 j 列像元第 m 次测量的亮场灰度值; $Y_{\text{dark}, T, i, j}$ 为亮场对应像元的暗场图像灰度均值。

选取视场中心 $25 \text{ pixel} \times 25 \text{ pixel}$ 区域计算不同曝光时间对应的信噪比,结果见表 2。当 CMOS 探测器输出信号为饱和值的 80% 时^[17],图像信噪比为 588.1。

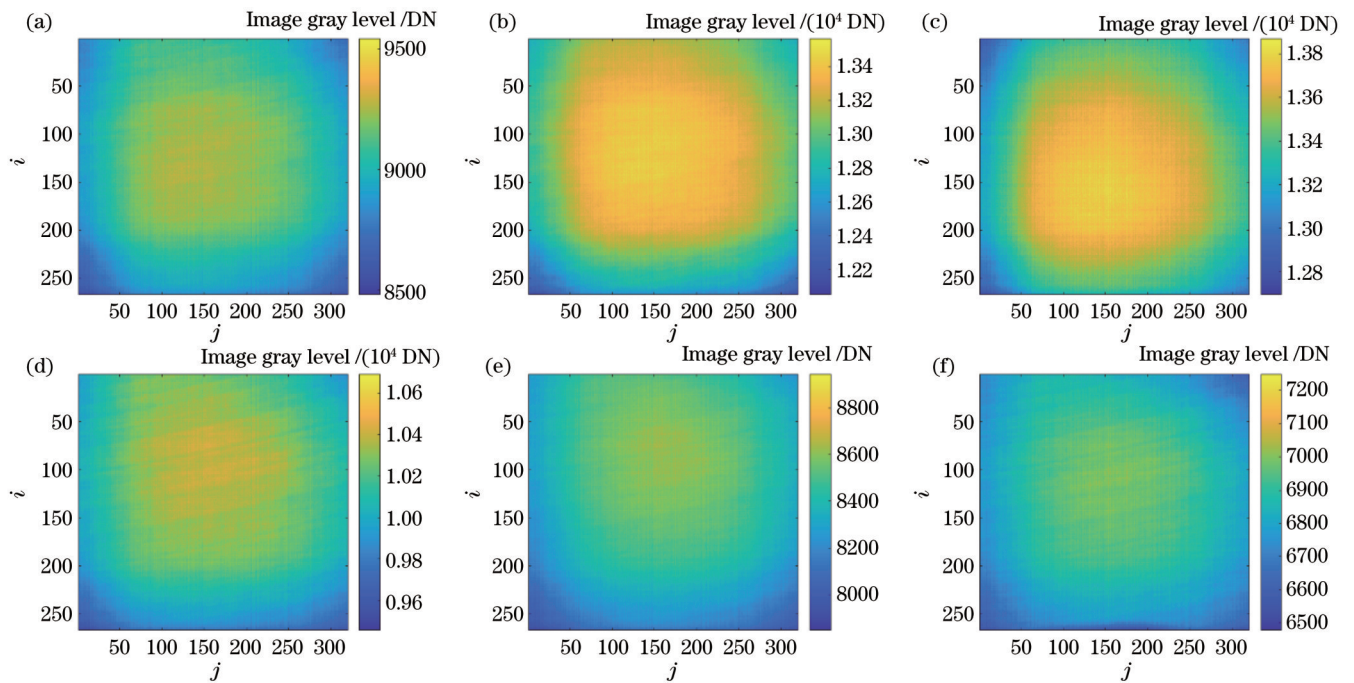


图 11 不同波长下的多光谱成像结果。(a) $\lambda=950$ nm; (b) $\lambda=910$ nm; (c) $\lambda=870$ nm; (d) $\lambda=765$ nm; (e) $\lambda=670$ nm; (f) $\lambda=490$ nm

Fig. 11 Multispectral imaging results under different wavelengths. (a) $\lambda=950$ nm; (b) $\lambda=910$ nm; (c) $\lambda=870$ nm; (d) $\lambda=765$ nm; (e) $\lambda=670$ nm; (f) $\lambda=490$ nm

表 2 不同曝光时间下的相机信噪比

Table 2 Camera SNR under different exposure time

T / ms	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
SNR	150.4	233.7	278.9	312.4	351.1	393.0	409.9	449.8	469.3	492.2	540.4	588.1

5.2 动态延时成像验证

图 12 为偏振方位角测试现场,在相机和积分球中间增加参考偏振片转台,参考偏振片由精密转台控制。转台带动参考偏振片在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内以 15° 间隔改变

参考偏振片的方位角。通过正弦拟合得到偏振方位角,选取 670 nm 的 3 条偏振通道进行验证,测试结果如表 3 所示,其中 P1~P3 表示 3 条偏振通道,偏振片安装时按照 60° 间隔安装。

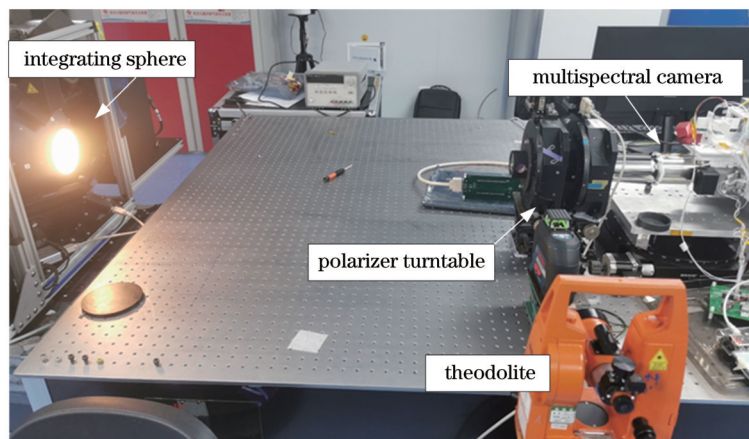


图 12 偏振方位角验证现场

Fig. 12 Absolute polarization azimuth test site

从表 3 可以看到,增加延时补偿后,在不同曝光时间下测得的偏振方位角基本一致,最大偏差小于 0.22° ,相较于无延时补偿有极大改善。

6 结 论

根据多光谱相机的功能需求,结合航天应用特点,

表 3 670 nm 的 3 条偏振通道的绝对偏振方位角测试结果
Table 3 Results of absolute polarization azimuth for three polarization channels at 670 nm

T / ms	Add delay			No delay		
	compensation $\alpha / (^{\circ})$			compensation $\alpha / (^{\circ})$		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
3	4.745	64.517	124.439	1.079	60.834	120.756
15	4.856	64.499	124.447	1.611	61.250	121.185
60	4.959	64.505	124.501	3.331	62.901	122.903

建立了基于长光辰芯公司的科学级 CMOS 探测器 HR400 的成像电子学系统,详细介绍了其系统构成,重点讨论了 CMOS 探测器的驱动设计、图像采集技术。针对滤光片轮式多光谱相机曝光时间变化会导致成像偏振方位角差异的问题,首先分析了成像位置对偏振方位角的影响,结合卷帘式快门 CMOS 探测器的工作原理,提出能够根据曝光时间动态调整的延时成像方法,设计了驱动时序并完成仿真验证;然后,对该延时成像方法的成像中心位置误差进行分析,在图像存储阶段,采用 2×2 像元合并的方式提高图像信噪比;最后,对成像质量和偏振方位角进行测试验证。实验结果表明,所设计成像系统的时域暗噪声为 71.6 (等效电子数),当系统光强为饱和光强的 80% 时,信噪比为 588.1,满足载荷成像要求。采用延时成像方法在不同曝光时间下测得的偏振方位角的最大偏差小于 0.22° 。该系统可为国产 CMOS 图像传感器的在轨应用和同类星载遥感仪器的设计提供参考。

参 考 文 献

[1] 李正强, 陈兴峰, 马龙天, 等. 光学遥感卫星大气校正研究综述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(1): 6-15.
Li Z Q, Chen X F, Ma L Y, et al. An overview of atmospheric correction for optical remote sensing satellites[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(1): 6-15.

[2] Xuan Z Y, Liu Q Q, Cui Z Z, et al. On-chip short-wave infrared multispectral detector based on integrated Fabry-Perot microcavities array[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(6): 061302.

[3] Wei Y, Han P L, Liu F, et al. Polarization descattering imaging: a solution for nonuniform polarization characteristics of a target surface[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(11): 111101.

[4] Li Y J, Zhang S X, Wu L H, et al. Polarization microwave-induced thermoacoustic imaging for quantitative characterization of deep biological tissue microstructures[J]. Photonics Research, 2022, 10(5): 1297.

[5] 康晴. 偏振传感器实验室系统级辐射与偏振定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
Kang Q. Research on system-level radiometric and polarized calibration methods in laboratory of polarization remote sensors [D]. Hefei: University of Science and Technology of China,

2018.

[6] 马骏, 肖喜中, 郎均慰, 等. 航空推扫高光谱成像仪 CCD 探测器选型研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1011001.
Ma J, Xiao X Z, Lang J W, et al. Study on selection of CCD detector of space-borne hyper-spectral imager[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1011001.

[7] 李云辉, 王晓东, 刘文光, 等. 天问一号高分相机 CMOS 曝光参数设计与卷帘校正[J]. 光学精密工程, 2022, 30(2): 143-152.
Li Y H, Wang X D, Liu W G, et al. CMOS exposure parameter design and rolling shutter distortion correction for Tianwen-1 high-resolution camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(2): 143-152.

[8] Mehta S, Patel A, Mehta J. CCD or CMOS image sensor for photography[C]//2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSPP), April 2-4, 2015, Melmaruvathur, India. New York: IEEE Press, 2015: 291-294.

[9] 张晓祥, 赵金宇, 贾建禄, 等. 卷帘快门 sCMOS 相机对空间碎片观测的影响研究[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1441-1449.
Zhang X X, Zhao J Y, Jia J L, et al. Study on the effect of rolling shutter sCMOS camera on space debris observation[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1441-1449.

[10] 解宁, 丁毅, 王欣, 等. 应用于高光谱成像的 CMOS 图像传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2015(7): 7-9, 13.
Xie N, Ding Y, Wang X, et al. CMOS active pixel sensor for hyperspectral imaging application[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(7): 7-9, 13.

[11] 张恒, 马庆军, 王淑荣. 紫外遥感仪器高速 CMOS 成像电子学系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 471-479.
Zhang H, Ma Q J, Wang S R. High speed CMOS imaging electronics system for ultraviolet remote sensing instrument[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 471-479.

[12] 时玮淞, 吕耀文. 基于 FPGA 的高分辨率科学级 CMOS 相机设计[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2020, 38(3): 291-300.
Shi W S, Lü Y W. Design of high resolution science CMOS camera based on FPGA[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2020, 38(3): 291-300.

[13] 石晶晶, 胡亚东, 李孟凡, 等. 云相机控制系统的设计及实现[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2001001.
Shi J J, Hu Y D, Li M F, et al. Design and implementation of cloud camera control system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2001001.

[14] 池杲鋈, 汪杰君, 李孟凡, 等. 云相机绝对辐射定标技术研究[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0612001.
Chi G J, Wang J J, Li M F, et al. Absolute radiometric calibration technique of cloud camera[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0612001.

[15] European Machine Vision Association. EMVA Standard 1288, standard for characterization of image sensors and cameras[EB/OL]. [2022-11-08]. <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-General-4.0ReleaseCandidate.pdf>.

[16] 周佐达, 陈迪虎, 路美娜, 等. 调焦调平线阵 CCD 成像系统超频读出设计[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 181-189.
Zhou Z D, Chen D H, Lu M N, et al. Overclocking readout design of focusing and leveling linear array CCD imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 181-189.

[17] 汪杰君, 池杲鋈, 李孟凡, 等. 云相机相对辐射定标技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0912001.
Wang J J, Chi G J, Li M F, et al. Relative radiometric calibration technique of spaceborne cloud detection camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0912001.

Design and Implementation of Spaceborne Multispectral Camera Imaging System

Ye Song¹, Yu Xinyu^{1,2,3}, Gan Ge^{2,3**}, Li Yang^{2,3}, Zou Zhengyu^{2,3}, Lu Meina^{2,3}, Luo Donggen^{2,3*}, Qiu Zhenwei^{2,3***}

¹*School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;*

²*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;*

³*Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China*

Abstract

Objective The components such as water vapor and aerosol in the atmosphere can lead to the blurring of high-resolution satellite remote sensing images, and the image quality will be seriously undermined. By means of multispectral imaging technology, an atmospheric correction instrument and the satellite main camera can obtain the atmospheric parameters in the same region at the same time, and the atmospheric correction for remote sensing images is carried out to improve the image quality. In the field of spectral imaging, CCD detectors are applied by most traditional cameras. However, with the rapid development of technology, CMOS detectors have been able to compete with CCD in terms of quantum efficiency, noise level, dynamic range and other key performance parameters, and have the tendency to gradually replace CCD detectors. To fill the gap of domestic scientific CMOS detectors in the field of space spectral imaging, we design a set of CMOS imaging electronics systems with high reliability and signal-to-noise ratio based on the scientific CMOS detector HR400 of Gpixel for the multispectral imaging requirements of a correction instrument project. Besides, a dynamic time-delay imaging method is proposed according to the characteristics of its filter wheel imaging, which solves the problem of polarization azimuth deviation caused by the variation of exposure time and provides a reference for the design of similar instruments.

Methods The system architecture is based on field programmable gate array (FPGA) and static random access memory (SRAM) buffer. The driver design and image acquisition technology of CMOS detectors is discussed in detail. To address the problem that the variation of the exposure time of the filter wheel multispectral cameras will lead to the difference in the polarization azimuth, the influence of the imaging position on the polarization azimuth is analyzed first. Then, combined with the working principles of the rolling shutter CMOS detectors, a time-delay imaging method is proposed, which can be dynamically adjusted according to the exposure time. The driving schedules are designed to complete the simulation verification, and the position error of the imaging center in the dynamic time-delay imaging method is analyzed. In the stage of image storage, a 2×2 binning method is devised to improve the image signal-to-noise ratio. Finally, a test platform is built to test the imaging quality of the camera, and the signal-to-noise ratio and dark noise of the imaging system are also tested. An experiment is conducted to compare the polarization azimuth before and after using the dynamic time-delay imaging method.

Results and Discussions For the filter wheel of multispectral polarization cameras, if the incoming light spot is taken as the starting point of imaging, the imaging center positions of the same channel are not consistent under different exposure time. The angle positions of the motor change with the variation of exposure time in the actual imaging. The increase in the difference in exposure time is accompanied by the enlargement of the difference in the polarization azimuth angle of the actual imaging (Fig. 2). The time sequence simulation of the dynamic time-delay imaging method shows that the different delay time before imaging can ensure the positions of the imaging exposure center are consistent under different integral time (Fig. 7). The angle position errors of the motor with dynamic delay compensation are about $\pm 0.087^\circ$, which is mainly affected by the motor positioning error, with weak influences from other error sources (Table 1). The image quality test results show that the temporal dark noise is 71.6 (equivalent electron number) and the SNR is 588.1 when the system light intensity is 80% of saturation light intensity, meeting the requirements of the camera (Table 2). In addition, with the addition of delay compensation, the maximum deviation of polarization azimuth angle measured under different exposure time is less than 0.22° , which is greatly improved compared with the method without delay compensation. The time-delay imaging method can significantly reduce the polarization azimuth difference caused by exposure time (Table 3).

Conclusions In this paper, an imaging electronics system based on the scientific CMOS detector HR400 of Gpixel is established according to the functional requirements of multispectral cameras and the characteristics of aerospace applications. The system structure is introduced in detail, and the driver design and image acquisition technology of CMOS detectors are discussed in particular. To address the problem of polarization azimuth difference caused by the variation of exposure time of the filter wheel of multispectral cameras, we analyze the influence of imaging position on polarization azimuth. The greater difference in exposure time is coupled with the greater difference in the polarization azimuth angle of actual imaging. Then, a time-delay imaging method is proposed, which can be dynamically adjusted according to the exposure time. The angle position errors of the motor with dynamic delay compensation are about $\pm 0.087^\circ$, mainly affected by the motor positioning error, and the influences from other error sources are less strong. Experimental results show that the time-domain dark noise of the imaging system is 71.6 (equivalent electron number), and the signal-to-noise ratio is 588.1 when the system light intensity is 80%, which meets the requirements of camera imaging. The maximum deviation of polarization azimuth angle measured at different exposure time is less than 0.22° . Therefore, the system is expected to provide some valuable references for the in-orbit application of domestic CMOS imaging sensors and the design of similar satellite-borne remote sensing instruments.

Key words imaging system; multispectral camera; CMOS; satellite imaging; signal-to-noise ratio