光电技术及应用

基于CIS的星敏感成像组件设计与实现

张维刚[1*]，谢志华[1]，车　驰[1]，胡晓东[2]，付政权[1]，曾兴瑜[1]

（1. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；2. 航空工业自控所，西安 710065）

摘　要： 针对星敏感器中高灵敏度大面阵探测器芯片稀缺性问题，提出基于国产高灵敏度CMOS图像传感器（CIS）的成像组件设计方案。依据星敏感成像组件工作原理，设计基于CIS的星敏感成像组件硬件电路系统，开发基于高级可扩展接口（Advanced Extensible Interface，AEI）总线的FPGA与DSP交互式高速数据传输软件模块，并对星敏感器实际应用中关注的非均匀性、线性度、动态范围以及信噪比等技术指标进行了测试。研究结果表明，该CIS星敏感成像组件的各项指标均满足恒星探测的实际应用需求。

关键词： 星敏感器；恒星探测；CIS

中图分类号： TN386.5；TP212.1　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0360－07

Design of Star-Sensor Photoelectric Imaging Module

ZHANG Weigang[1], XIE Zhihua[1], CHE Chi[1], HU Xiaodong[2], FU Zhengquan[1], ZENG Xingyu[1]

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN;
2. The Flight Automatic Control Research Institute of AVIC, Xi'an 710065, CHN)

Abstract: To address the scarcity of large-pixel large-area array detector chips used in star sensors, a design scheme for an imaging module based on domestic high-sensitivity CMOS image sensors (CISs) is proposed. The hardware circuit of the CIS-based star-sensitive imaging module is designed based on the latter's operating principle. An interactive high-speed data-transmission mode for FPGA and DSP software is developed based on an advanced extensible interface bus-control module. Technical parameters related to the practical application of star sensors, i. e., non-uniformity, linearity, dynamic range, and signal-to-noise ratio, are tested. The results show that these indicators of the CIS star-sensitive imaging module satisfy the application requirements for star detection.

Key words: star sensor; star detection; CIS

0　引言

星敏感器成像组件被广泛应用于空中卫星、地面导弹和海上舰船等多种平台，能确保这些平台上的姿态测量设备稳定且高精度地运行。随着光电集成技术的发展，星敏感器能集成到各类导航和探测系统中，从而提高集成系统的灵敏度和精度[1-3]。基于广角光学透镜的星敏感器多用于天体导航系统中[4-5]，然而其需要在暗背景下才能探测到暗星。在视场范围内，只需要探测到三颗星，便可以使用星图匹配方法进行姿态测量。然而，在航空应用环境中，星探测的能力与视场之间存在矛盾[6]。因此，需要将视场变小，以满足强天空背景下的星探测能力，这表明同一时刻探测到的恒星数量减少。此外，航空用星敏感器通常与惯性测量单元（The Inertial Measurement Unit，IMU）相结合，组成惯性-

收稿日期：2025－03－10.

* 通信作者：张维刚

恒星一体化导航系统，以此解决视场不足的局限性，为天文测量提供更大的视野范围。同时，对星敏感器的多次输出结果进行卡尔曼滤波，可以有效修正陀螺仪的漂移误差，以便实现高精度导航。然而，目前星敏感器存在两个局限：首先，在白天强背景下，星敏感器的探测能力下降，信噪比较低；其次，在动力学的影响下较难提取到高精度的星斑质心[7]。Tan 等[8]、Sun 等[9]在动态复杂背景下使用质心误差补偿算法对星斑进行优化。然而，这类算法具有较高的复杂性，无法满足航空成像过程中的实时性需求。LN-20 恒星惯性参考单元通过在相对稳定的平台上进一步牺牲视场的方式解决了该问题[1]。由此可见，通过牺牲视场能在一定程度上抑制天空强背景，同时稳定的平台能解决飞机动力学的影响。然而，稳定平台通常由四个伺服控制回路来维持稳定，这种设计往往需要在结构紧凑和体积上做出妥协。针对以上问题，Kondo 提出基于中视场星敏感器理论，在缩小体积的同时有效提高了系统鲁棒性[10]。该理论提出采用基于方位万向节的 360°环形视场的方式来确保同一时刻能够至少检测到三颗星。

此外，在图像传感器应用方面，尤政等[11]对比了 CMOS 图像传感器和 CCD 图像传感器的优缺点，介绍了 CMOS 图像传感器在小型化和低功耗方面的优势。郑拓等[12]基于国产的 CMOS 图像传感器设计一款微小型星敏感器的电学系统，然而该传感器分辨率较小，且并未实现量产化。沙鑫宽[13]基于 Xilinx 等国外厂家的核心元器件设计了星敏感器硬件系统，无法满足国产化需求。

基于以上 Kondo 的中视场星敏感器理论和相应成像组件国产化的需求，设计一种适用于中视场的 CIS 星敏感成像组件，该 CIS 星敏感成像组件在动态范围、非均匀性、响应度等指标均满足星敏感器恒星探测的要求。同时 CIS 星敏感成像组件具有帧率高、体积小和功耗低的优点。在实际应用中，采用固定曝光时间和多帧累积的方法来提高图像信噪比，从而提高强天空背景下的星探测能力。

本文首先介绍了 CIS 星敏感成像组件的工作原理，然后对 CIS 星敏感成像组件的设计过程进行了详细说明，最后分别从非均匀性、响应线性度、动态范围和信噪比等方面对所提 CIS 星敏感成像组件进行了测试分析和总结，验证了所设计的 CIS 星敏感成像组件能够满足星敏感器的实际应用需求。

1　CIS 星敏感成像组件工作原理

CIS 星敏感成像组件基于高灵敏度低噪声 CIS 进行设计，主要工作原理是 CIS 在相应的偏置电压、时序驱动下将恒星及其所处天空背景的光信号转换为对应的电荷信号，经过行列选择、数字量化、串行编码后输出表征光能量强度的数字图像信息到 FPGA，在 FPGA 进行图像解码、曝光控制、疵点校正（DPC）、非均匀性校正后将图像数据通过 EMIF 接口传输到 DSP，在 DSP 内部进行恒星探测、迭代以及跟踪运算，达到识别跟踪恒星的目的[14-16]。

CIS 星敏感成像组件原理框图如图 1 所示。主要由成像镜头、CIS 图像传感器、FPGA 数字信号处理电路、DSP 数字信号处理器、DRAM 存储器、FLASH 存储器、LDO 电源变换模块、DC/DC 电源

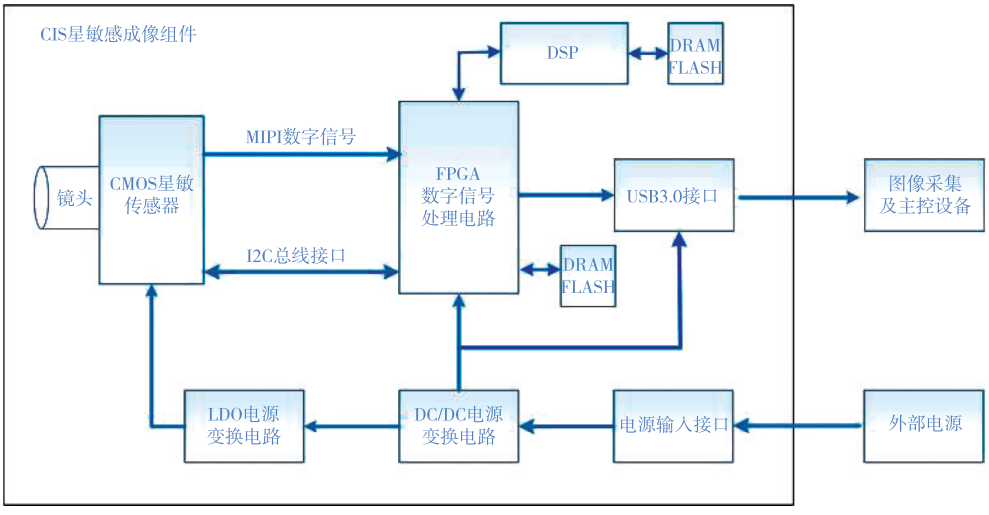


图 1　CIS 星敏感成像组件原理框图

变换模块以及USB3.0接口组成。其中,DRAM存储器起图像处理过程中对图像数据进行缓存的作用,FLASH实现FPGA配置程序和DSP运行程序的存储,LDO为CIS图像传感器提供低噪声偏置电压,DC/DC主要为FPGA和DSP提供电源电压,USB3.0实现图像数据的高速传输。

2 电路设计

2.1 CIS特性

所选用的CIS主要指标参数如表1所示,该图像传感器为背照式大像元科学级CIS,具有灵敏度高、噪声低以及动态范围宽等优点,其读出噪声为1.6 e^-,满阱电子数为91 ke^-,在HDR模式下动态范围高达94 dB,在制冷模式下,具有极低的暗电流(小于0.2 e/s/pixel@−50 ℃),并且该CIS的QE值最高达90%以上,光谱响应曲线如图2所示。因此,该CIS借助其极低暗电流、低读出噪声、高动态范围以及高光谱响应率等优点,以实现拍摄高信噪比星空图像的目的。

表1 所选CIS的主要参数指标

参数指标	参数值
像元尺寸/μm^2	11×11
分辨率/pixels	2 048×2 048
ADC位宽/bit	12
读出噪声/e^-	1.6
满阱电子数/ke^-	91
暗电流/(e/s/pixel@−50 ℃)	0~0.2

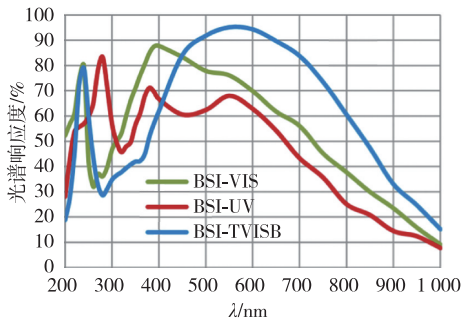


图2 所选CIS光谱响应曲线

2.2 CIS应用电路设计

该CIS所需的驱动信号如图3所示,主要包括四组供电电压、SPI信号、时钟信号、解耦信号等。四组供电电压分别是VDD33A,VDDPIX,VDD18D和VDD18PLL。其中VDD33A为模拟3.3 V电压,VDDPIX为3.6 V像素供电电压,VDD18D为数字的I/O电压,VDD18PLL为1.8 V的内部锁相环供电电压。这部分电压除I/O电压外,其余三组电压都有低噪声要求,且该四组电压负载较低,最大电流不超过300 mA。因此,设计中采用低噪声负载能力为500 mA的LDO实现电源变换,满足CIS偏置电压需求。SPI信号为FPGA与CIS之间的通信信号,主要实现对CIS的配置、积分时间的设置、帧率的设置等。时钟信号为FPGA提供给CIS的主时钟,CIS内部根据该时钟进行同步、串行输出等。解耦信号、复位信号、解码控制以及时序信号是FPGA提供给CIS正常工作、输出图像数据的必要控制信号。

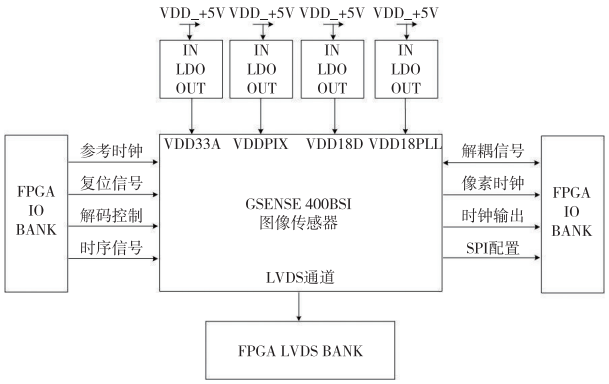


图3 CIS星敏感传感器电路框图

2.3 数字信号处理电路设计

本设计信号处理电路方案选用FPGA和DSP协同处理方式。所采用的FPGA拥有326080逻辑单元,50950自适应逻辑模块,15.64 Mbits嵌入式内存以及400 I/O;DSP为高性能定点DSP,最高时钟频率1 GHz,计算速率8 000 MIPS,采用L1,L2缓存架构,L2缓存高达8 M-Bit,具有2个外部存储器接口EMIFA和EMIFB,可以连接异步同步存储器,寻址空间高达1 280 M-Byte。如图4所示,FPGA与DSP之间通过EMIFA接口连接,进行图像数据的交换,数据同步采用内嵌同步码的方式进行;DSP外挂SDRAM进行程序缓存以及图像处理过程中的图像数据的缓存,外挂的FLASH用作程序存储器,用于BOOTLOADER;FPGA外挂DDR3用于处理过程中图像数据的缓存,外挂的FLASH用于程序存储和参数保存;设计中还预留RS422串行接口电路用于与系统之间的通信接口以及陀螺数据的接收;USB接口电路为USB3.0接口,用于图像数据的实时传输,在上位机进行图像采集及显示;电源变换主要产生FPGA和DSP工作时所需的内核、I/O以及辅助电压。

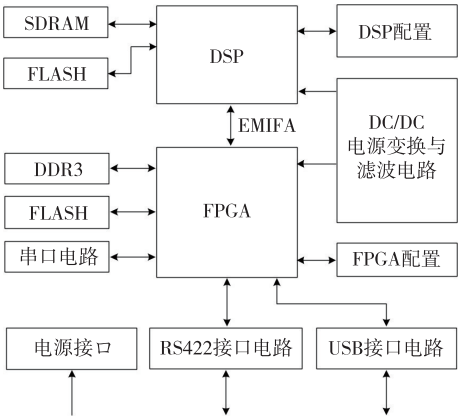


图4　FPGA工作原理图

信号处理电路的工作流程为FPGA接收CIS输出的图像数据，并进行图像数据解码、疵点补偿和非均匀性校正等处理，然后将处理后的图像数据通过EMIFA接口传输到DSP，DSP接收到图像数据后运行恒星探测算法，计算出恒星的坐标位置后将该坐标位置反馈给FPGA。FPGA将恒星坐标位置信息通过RS422反馈给系统。同时，FPGA还将处理完的图像数据通过USB3.0接口传输到上位机进行显示。

3　恒星探测算法

实验假设行坐标和列坐标的变化量分别为(t_u, t_v)，旋转量为ϕ。星敏感器的姿态变化可以通过x，y和z轴的依次旋转来获得。旋转的欧拉角记为$(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$。$(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$和$(t_u, t_v)$之间的关系表示如下：

$$\begin{cases}\theta_x = \arctan\left(\gamma_u, \dfrac{t_u}{a}\right)\\ \theta_y = \arctan\left(\gamma_v, \dfrac{t_v}{b}\right)\\ \theta_z = \varphi\end{cases} \tag{1}$$

式中，a和b分别为恒星图像在x和y轴上的最大像素数量，γ_u和γ_v分别为星敏感器在x和y轴上的视场。

以第一帧恒星图像作为参考帧，那么第k帧的坐标(u_k, v_k)可以使用变化量(t_u, t_v)更新为(u_k', v_k')，同时使用φ来补偿星敏感器的姿态变化，对应坐标点的灰度值在姿态补偿前后需要保持不变。(u_k', v_k')和(u_k, v_k)的关系式为：

$$\begin{cases}u_k' = u_k\cos\varphi + v_k\sin\varphi + t_u\\ v_k' = -u_k\sin\varphi + v_k\cos\varphi + t_v\end{cases} \tag{2}$$

由于恒星图像的坐标(u_k', v_k')可能为非整数，可使用线性插值的方式来提高坐标值精度。考虑到计算的精度和速度，实验选择三次线性插值的方式进行计算，插值后的恒星图像尺寸是原恒星图像尺寸的三倍。经过平移和旋转变换后恒星图像必须恢复到原始尺寸。

采用Duncan推荐的多帧恒星信号处理方法和天空背景消除方法来提高信噪比[6]，如公式(3)所示。首先，对每个像素对应的电荷量D_k进行响应度R_k校正，以使得校正结果接近入射光功率。这对于可靠的探测和精确的质心计算是非常重要的。然后，减掉亮帧图像的平均电荷量B，在视场范围内随机取16个像素的电荷量D_k并计算均值。最后，减去每个像素的平均背景C_k，可得到天空背景下星敏感器在许多帧图像上的平均值A_k，该结果是使用简单的“漏桶”积分器对N帧进行平均得到的。为保证计算的效率，N被限制为2的指数形式，通常是4、8或16，选值大小由恒星的等级决定。较亮的恒星需要较小的N值，而较暗的恒星需要较大的N值。滤波结果用A_k数组表示：

$$A_k(N+1) = A_k(N) + \frac{D_k(N+1)\times R(k) - B - C_k - A_k(N)}{N} \tag{3}$$

通过公式(3)计算得到多帧积累的恒星图A_k之后，便可以使用多帧积累算法得到的恒星图进行后续处理[17]。接下来，将对该算法得到的恒星图进行相关实验，以验证基于该算法的恒星图的有效性。

4　软件设计

软件部分包括FPGA软件和DSP软件，其中FPGA实现CIS逻辑时序控制、编解码以及图像数据传输等功能。本设计对DSP的EMIF接口进行优化设计，并将其应用到FPGA和DSP之间。在FPGA逻辑中，将FPGA映射为DSP的外部存储器，将DSP映射为FPGA的外部接口设备，以实现DSP和FPGA间高速图像数据的传输。在FPGA逻辑中自主研发设计AEI总线控制模块，所有的功能模块都以外设的方式连接到总线上，通过仲裁机制，按优先级处理总线上的数据及通信，DSP和FPGA之间通过EMIF数据传输模块连接到该总线

上。通过总线，EMIF数据传输模块可访问FPGA控制的DDR3和RS422等外部设备，从而实现高速图像数据的读取操作，以及恒星坐标的回传操作。

4.1 FPGA软件设计

FPGA软件以AEI总线为主干道，采用优先级仲裁机制实现CIS的驱动时序、配置、LVDS图像数据的解码、AE自动曝光、BIT自检、DDR3控制、USB3.0接口控制与实现、RS422串口通信以及FLASH读写实现等。如图5所示，所涉及的软件模块由CIS配置模块、DSP通信模块、LVDS模块、EMIF数据传输模块、BIT模块、DDR3控制器模块、FLASH控制模块、RS422通信控制模块、非均匀性校正模块以及USB3.0接口模块组成，所有模块挂载于AEI总线上。

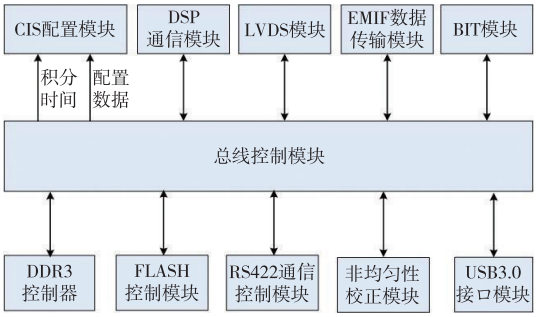


图5 FPGA软件功能框图

CIS配置模块在初始化时根据SPI控制时序对CIS进行初始化寄存器配置，CIS通过LVDS信号输出正确的图像数据信号；LVDS模块需要对图像数据进行解码，解出帧行同步、像素时钟以及图像数据；DSP通信模块实现EMIF传输数据同步，DSP完成恒星探测算法后将恒星坐标传输到FPGA，FPGA最后将星坐标结果传输到系统；EMIF数据传输模块将每帧图像数据存储于FIFO中，根据DSP给出的地址总线、片选信号将数据输出到EMIF的数据总线，DSP通过EMIF完成每帧图像数据的读取；BIT模块检测各硬件模块的工作状态是否正常，然后在每帧图像里反馈自检状态；DDR3控制器主要实现对DDR3的时序控制，能够正确地将图像数据缓存到DDR3中，并能正确读取图像数据；FLASH控制器主要实现对配置FLASH芯片的数据读写控制，完成一些参数的固化保存；RS422通信控制模块主要实现通信命令编解码的功能；非均匀性校正模块通过测试分析图像的非均匀性，采用两点校正算法对图像的非均匀性进行校正处理；USB3.0接口模块按照USB数据传输协议对图像数据进行编码，并传输到数传单元。

4.2 DSP软件设计

本设计中，CIS星敏感成像组件采用高性能定点DSP，该型DSP基于VLIW（甚长指令字）架构，支持8位并行乘法累加（MAC）操作，兼容C64x系列指令集，适用于实时信号处理。

软件设计基于TI公司的设计平台编写软件代码，主要实现每帧图像数据的读取和恒星探测算法，最后将恒星的坐标位置传输到FPGA，软件流程如图6所示。程序开始运行，进行DSP初始化配置，包括关键寄存器初始化、时钟与电源管理初始化、外设初始化以及中断向量表加载等；然后通过查询GPIO电平状态判断FPGA端图像数据是否就绪，如图像数据未就绪，则继续等待，如就绪，则执行恒星探测算法；根据探测算法的结果判断图中是否有星，如没有星，则返回读取新一帧图像数据，如有星，则计算出恒星的位置坐标；最后通过UART传输到FPGA进行打包处理，程序运行结束。

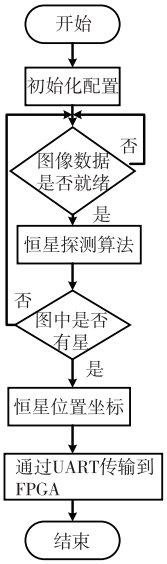


图6 DSP软件设计流程图

5 指标测试

鉴于星敏感器对成像的非均匀性、响应线性度、动态范围和信噪比等性能指标具有较高要求。因此，本设计完成后对这几个性能指标进行了测试。

5.1 非均匀性测试及校正

为满足星敏感器的搜星要求，非均匀性指标需小于等于3%。鉴于星敏感器白天应用的特殊环

境，同时考虑到探测器在响应区间的中段性能最佳，选取*DN*值30 000左右的数据进行处理，作为校正数据。

如图7所示，在CIS星敏感成像组件图像数据校正前，探测器在响应区间的中段非均匀性为12%左右，校正后该区域的非均匀性为1%左右。

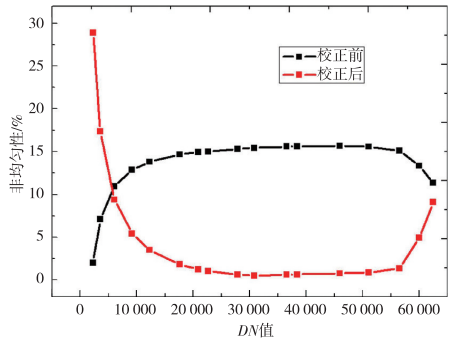


图7　CIS星敏感成像组件非均匀性曲线图

5.2　响应线性度测试

星敏感器对响应线性度的指标要求为大于等于97%。在CIS星敏感成像组件测试中，调整积分球的亮度，在不同光强下各取100帧数据求平均，然后计算图像均值，在不同的亮度下，均值的最大值为60 055，最小值为6 018。将数据进行曲线拟合，根据线性拟合的结果计算偏差，最大偏差为1 477，因此响应线性度为97.3%，测试数据及线性拟合如图8所示。

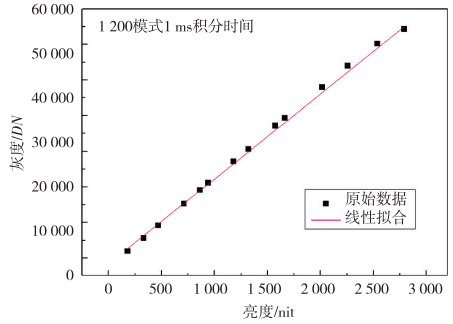


图8　CIS星敏感成像组件响应线性度拟合图

5.3　星图动态范围测试

星敏感器对动态范围的指标要求为大于等于67 dB。动态范围通过饱和信号均值和暗场信号均值求差值后与暗场信号均方根噪声的比值得到，计算公式为：

$$DN = 20\log\frac{DN_{\mathrm{sat}} - DN_{\mathrm{dark}}}{DN_{\mathrm{noise}}} \tag{4}$$

式中，DN_{noise}为均方根噪声，DN_{dark}为暗场信号均值，DN_{sat}为饱和信号的均值。测试数据记录如表2所示。

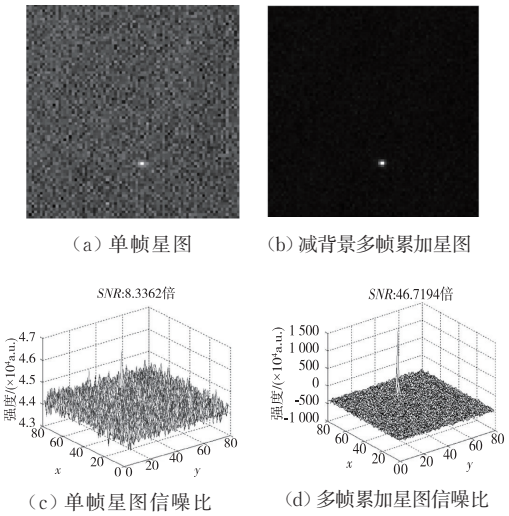
按照公式(4)，可得CIS星敏感成像组件的动态范围为67.8 dB。

表2　动态范围测试数据

参数	测量值
DN_{noise}/dB	25.9
DN_{dark}/dB	2 051
DN_{sat}/dB	65 520

5.4　星图信噪比测试

为了利于搜星，星敏感器对单帧星图信噪比指标要求为大于等于8。星图信噪比(SNR)为观测到恒星亮度均值与背景亮度均值之差，然后与背景均方根噪声的比值。CIS星敏感成像组件单帧星图以及减背景后多帧累加星图的信噪比及灰度直方图如图9所示。



(a) 单帧星图　(b) 减背景多帧累加星图

(c) 单帧星图信噪比　(d) 多帧累加星图信噪比

图9　单帧及多帧星图的信噪比测试图

6　结论

本文采用国产化高灵敏度大面阵CIS进行星敏感成像组件设计，以FPGA和DSP芯片为逻辑主控和运算单元进行硬件电路的研究，并基于Vivado和CCS软件平台开发FPGA软件和DSP软件，以AEI总线及优先级仲裁机制实现了CIS的配置、图像数据解码、非均匀性校正、通信、图像数据缓存及传输以及恒星探测定位等功能。通过试验测试，采用国产高灵敏度大面阵CIS所设计的组件非均匀性为1%，线性度为97.3%，动态范围为67.8 dB，多帧累加图像信噪比为46.7 dB，以上技术指标均满足星敏感器的使用要求。

参考文献：

[1] Niemela J. The integrated inertial navigation system AN/ASN-132[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1982, 29(4): 279-288.

[2] Lei H, Li B, Wei Q, et al. Inertial information based star detection for airborne star sensor [J]. Optics & Laser Technology, 2023, 162: 109325.

[3] Murphy M, Armacost S, Barnes R, et al. Ballistic missile guidance system test in an aircraft pod[C]// AIAA Guidance, Navigation, Control Conference and Exhibit, 2000: AIAA2000-4387.

[4] Levine S, Dennis R, Bachman K L. Strapdown astro-inertial navigation utilizing the optical wide-angle lens startracker[J]. Navigation, 1990, 37(4): 347-362.

[5] Belenkii M, Bruns D G, Vincent A R, et al. Daytime stellar imager. U.S., 7349804B2[P]. 2008.

[6] Duncan T M. A daylight stellar sensor using a charge-coupled device[J]. Proc. SPIE, 1989, 2: 1111.

[7] Liebe C C, Gromov K, Meller D M. Toward a stellar gyroscope for spacecraft attitude determination[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2004, 27(1): 91-99.

[8] Tan W, Qin S, Myers R M, et al. Centroid error compensation method for a star tracker under complex dynamic conditions[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33559.

[9] Sun T, Xing F, You Z, et al. Smearing model and restoration of star image under conditions of variable angular velocity and long exposure time[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 6009-6024.

[10] Kondo N. Application of zero-lock laser gyro technology to high accuracy stellar-inertial systems [C]// Institute of Navigation, National Meeting, 1992: 253-262.

[11] 尤 政，李 涛. CMOS图像传感器在空间技术中的应用[J]. 光学技术，2002, 28(1): 31-35.
You Zheng, Li Tao. Application of CMOS image sensor in space technology [J]. Optical Technique, 2002, 28(1): 31-35.

[12] 郑 拓，王冠雅. 国产化微小型星敏感器研究及应用[J]. 电子技术应用，2018, 44(1): 76-78, 83.
Zheng Tuo, Wang Guanya. Research and application of domestic micro star sensor [J]. Application of Electronic Technique, 2018, 44(1): 76-78, 83.

[13] 沙鑫宽. 面向微小卫星的星敏感器工程化设计与实现[D]. 杭州：浙江大学，2020.
Sha Xinkuan. Engineering design and implementation of star tracker for micro-satellite [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[14] 王祖军，聂 栩，唐 宁，等. CMOS图像传感器辐射敏感参数测试电路设计及试验验证[J]. 半导体光电，2024, 45(2): 216-221.
Wang Zujun, Nie Xu, Tang Ning, et al. Test circuit design and radiation experiment verification of CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 216-221.

[15] 李 明，刘戈扬，傅 婧，等. 全局/滚动曝光兼容高动态抗辐照CMOS图像传感器设计[J]. 半导体光电，2024, 45(4): 568-574.
Li Ming, Liu Geyang, Fu Jing, et al. CMOS image sensor design with global/rolling exposure compatibility, high dynamics and radiation resistance [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(4): 568-574.

[16] 刘戈扬，刘昌举，翟江皞，等. 多光谱TDI-CMOS图像传感器读出电路设计[J]. 半导体光电，2023, 44(4): 525-531.
Liu Geyang, Liu Changju, Zhai Jianghao, et al. Design of a multispectral TDI-CMOS image sensor readout circuit [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(4): 525-531.

[17] Belokurov V, Koshelev V, Kagalenko M. The use of characteristic functions in the multi-frame accumulation algorithm [C]// 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2019: 1-6.

作者简介：

张维刚(1981—)，男，主要从事CIS成像技术的研究。