

文章编号: 2095-4980(2022)08-0863-06

基于张量优化的高动态范围微光相机设计与实现

李馨, 唐琦, 周海岸, 南诺, 冯兴泰, 袁远

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 针对空间低照度环境下, 互补金属氧化物半导体(CMOS)相机成像视觉效果不佳的问题, 基于张量优化的图像融合方法研制一款高动态范围的微光相机。分析基于科学互补金属氧化物半导体(sCMOS)图像传感器亮暗场双通道ADC的电路特性, 利用同源双通道图像数据构建三阶特征张量, 通过对特征张量的平行因子分析, 以融合图像动态范围最优为评价函数, 引入拉格朗日乘数法作为张量分解的优化算法, 实现实时的高分辨率高动态范围成像。研制一款基于LTN4625的微光相机, 并进行成像实验。仿真实验结果表明, 相机实现了50帧/s, 4 608×2 592像素的高分辨率高动态范围成像, 图像动态范围从低增益数据的5.2 dB和高增益数据的11.4 dB提高到了54.7 dB。该设计是一种微弱光环境下动态响应范围高、成像效果好的微光相机设计方法。

关键词: sCMOS 图像传感器; 张量分解; 图像融合; 高动态范围

中图分类号: TN47

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021407

Design and implementation of a high dynamic range low-level-light camera based on tensor optimization

LI Xin, TANG Qi, ZHOU Haian, NAN Nuo, FENG Xingtai, YUAN Yuan

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: A low-light-level camera system is designed based on the scientific Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) image sensor LTN4625 in order to meet the requirements of the high resolution and high dynamic range low light imaging system. According to the readout structure characteristics of pixel of LTN4625, the FPGA is taken as the control core of the camera system and an image fusion algorithm based on tensor optimization is proposed. The dynamic range of the camera is extended effectively and the image quality is improved. The imaging test results show that the camera can output pictures at 50 fps and the resolution of image is 4 608×2 592. The dynamic range of image is improved to 54.7 dB from 5.2 dB for low gain data and 11.4 dB for high gain data. This design is a kind of low-light-level camera design method with high dynamic response range and good imaging effect under weak light environment.

Keywords: scientific CMOS; tensor decomposition; image fusion; high dynamic range

微光探测技术在医学诊断、智能监控、天气观测和航天遥感等领域发挥着重要的作用。随着该技术的发展, 适用于微弱光条件下成像的科学级CMOS(sCMOS)图像传感器, 在微光成像系统中得到广泛应用^[1]。科学级CMOS具有低成本、低功耗、高帧频大面阵、灵活开窗等一系列优点, 有利于实现轻小型的微光相机设计^[2]。

科学级CMOS通常都能输出多增益(一般为低增益和高增益2种)的原始数据, 可通过后期的数据融合得到更高动态范围的图像数据, 改善成像效果。目前常用的融合算法包括阈值选择法、能量占比法和曲线拟合法等。阈值选择法是指设定一个阈值 D_H , 当高增益通道数据小于该阈值时, 选择高增益通道数据作为输出图像, 否则选择低增益通道数据作为输出图像; 能量占比法与阈值选择法类似, 它是通过分析高低增益倍数差导致的像素灰度值差异来设定一个阈值 D_L , 当低增益通道数据像素灰度值小于 D_L 时, 认为高增益通道数据未饱和, 选择高增益数据作为输出图像, 否则将低增益数据增大一定倍数作为输出图像; 曲线拟合法则是设定一个三段式拟合曲线, 以 $[D_A, D_B]$ 为数据衔接区间, 当高增益通道数据大于 D_A 时, 直接输出高增益数据, 当高增益通道数据小

收稿日期: 2021-12-02; 修回日期: 2022-02-09

于 D_B 时, 将低增益数据增大一定倍数作为输出图像, 当其处于衔接区间时, 以某种方法(如最小二乘法)将高低增益拟合成新的图像数据输出。上述融合算法各有优缺点, 阈值选择法简单直接, 能直观看到高低增益数据, 但是在阈值周围容易出现灰度值跳跃的现象; 能量占比法同样直观, 计算也不复杂, 但是会损失低增益数据中的信息, 只适合光照较弱的场景; 曲线拟合法输出图像可视性较好, 但是阈值和拟合曲线的选择需要较多的考虑场景, 且作为像素级融合, 需要对原始图像进行一些预处理, 以免带入原始噪声等^[3-7]。为研究获得高质量的图像, 本设计选用了美国仙童公司的大面阵 sCMOS 图像传感器 LTN4625, 根据其芯片像素输出高低增益数据的读出特点, 选用 FPGA 作为控制核心, 完成了包括传感器时序驱动、高速数据采集及图像输出等功能, 采用了一种基于张量分析的图像融合算法, 实现了卷帘模式下高分辨力高动态范围的微光相机设计。

1 微光相机系统设计

LTN4625 是仙童公司开发的科学级 CMOS 图像传感器, 在卷帘读出模式下, 通过片内集成相关双采样电路能较好地抑制读出噪声, 具有高分辨力、高动态范围和低噪声等特点, 适用于微光成像系统。其基本性能参数见表 1。

除了低读出噪声, LTN4625 的高动态范围主要得益于芯片内自带的可调列增益放大器, 配合双模拟至数字转换器(Analog to Digital Converter, ADC), 它能够同时输出 2 种增益的 11 bit 量化图像数据, 选择合适的图像融合算法即可获得更高动态范围的图像。相机系统结构如图 1 所示。

表 1 LTN4625 基本性能指标

Table1 LTN4625 basic performance indicators

performance indicators	parameter value
pixel number	4 608×2 592
FPS	240 fps(rolling shutter, silent frame)
dynamic range	>88 dB
output rate	3.125 Gps×32
output data bit width	11 bit×2
column gain amplifier	1×(low gain channel) 15×or 30×(high gain channel)

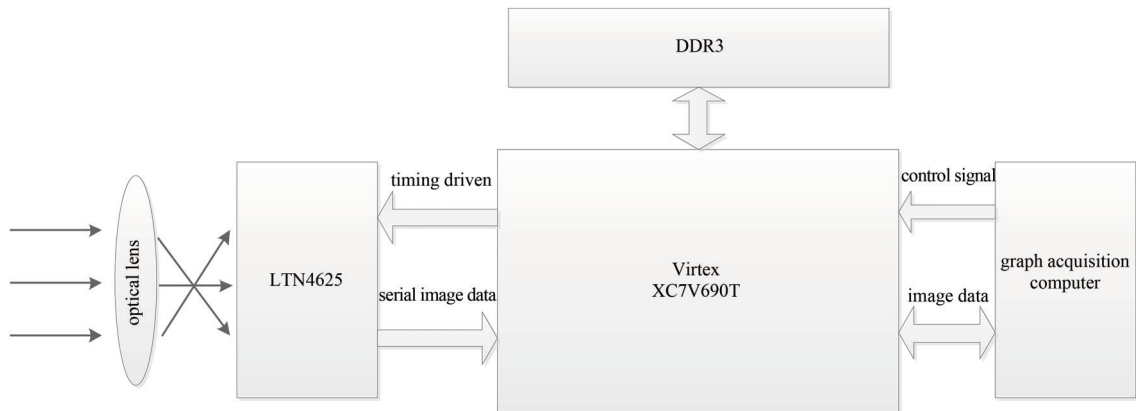


Fig.1 Diagram of camera system structure

图 1 相机系统结构框图

为满足采集 LTN4625 多路高速传感器图像数据, 以及后续进行大量数据处理计算以实现图像融合算法的需求, 微光相机系统采用 Xilinx 公司 Virtex 7 系列高性能 FPGA 的 XCV7690T 作为控制核心, 实现包括传感器时序驱动, 采集图像数据, 完成图像融合等功能。图像数据缓存在 DDR3 中, 通过 Camera Link 接口输出, 由图采计算机采集显示。相机的工作流程为: 相机加电后, 完成 LTN4625 的上电时序控制, 然后根据控制指令信号, 设置传感器内部寄存器, 并使用外部触发管脚使其工作在相应状态。FPGA 采集传感器输出的高速原始数据, 缓存并进行图像融合等处理, 最后将数据以 Camera Link 格式输出给图采计算机显示, FPGA 内部模块框图如图 2 所示。

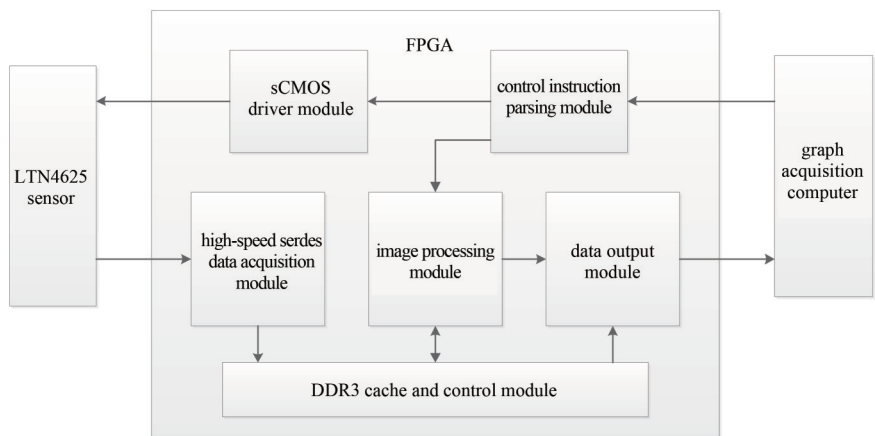


Fig.2 Diagram of FPGA internal module

图 2 FPGA 内部模块框图

2 基于张量分析的图像融合算法

随着多传感器技术和成像技术的不断提高，图像融合技术快速发展。它是将多幅源图像结合起来，集成或整合其中的冗余及互补信息，以求改善信噪比，提高可靠性，获得更清晰、更全面的融合图像^[8]。

LTN4625 能同时输出来自高低增益通道的两路 11 bit 数据，高增益通道可设为 30 倍或者 15 倍。其中，低增益数据可表示更大的动态范围，而高增益数据具有更高的数据精确度。通过选择一种有效的数据融合方法，则可以获得更全面的图像信息，提高动态范围。上文提到的 3 种融合方法都是直接对像素进行操作，原始数据的优缺点均会叠加，且容易受噪声等干扰。本设计基于张量分析，通过将图像数据建模为三阶张量，然后将张量进行分解、补全及重构，通过判断融合后的图像动态范围是否满足要求，最终实现 2 种增益数据的融合，得到更高动态范围的图像。算法的流程如图 3 所示。

与像素直接融合相比，张量能更有效地表示多维数据，并能够精确地提取多维数据中的相关特征。通过张量的分解，无需设定阈值即可有效提取数据中的结构特征，是一种完全数据驱动的方式。张量分解能够降低数据的维度，作为一种有效的图像分析方式，在高光谱图像去噪、视频处理、机器视觉等方面都得到较多应用^[9]。

2.1 图像的张量建模

首先，将传感器图像建模为三阶特征张量： $\chi \in R^{m \times n \times 3}$ ，其中， m 和 n 分别指图像中像素的行数和列数，3 表示该模型包含高增益、低增益和融合后的数据。例如， $\chi_{m,n,0}$ 表示传感器第 m 行第 n 列的低增益数据。图 4 为图像的张量模型。将融合数据视为张量中缺失的信息，基于张量分析的图像融合即对该张量进行分解、重构和补全，从而得到融合高低增益数据后的更高动态范围的图像^[10-13]。

2.2 图像的张量分解

若张量称为可分解张量，则 $\chi \in R^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$ 可以分解为：

$$\chi = a^{(1)} \circ a^{(2)} \circ \dots \circ a^{(n)} \quad (1)$$

式中 $a^{(i)}$ 为长度为 I_i 的向量； \circ 表示向量的外积运算，由于 $a^{(i)}$ 为秩 1 向量，故上述分解成为张量的秩 1 分解； χ 为一个秩 1 张量。

设计中的张量分解采用目前应用较为广泛的规范多元 (Canonical Polyadic, CP) 分解，这是 1927 年 Hitchcock 提出的一种分解方式，即将一个张量表示成有限个秩一张量之和。例如，当给定一个三阶张量 $\chi \in R^{I \times J \times K}$ ，它分解的形式如图 5 所示。

即该张量可表示为：

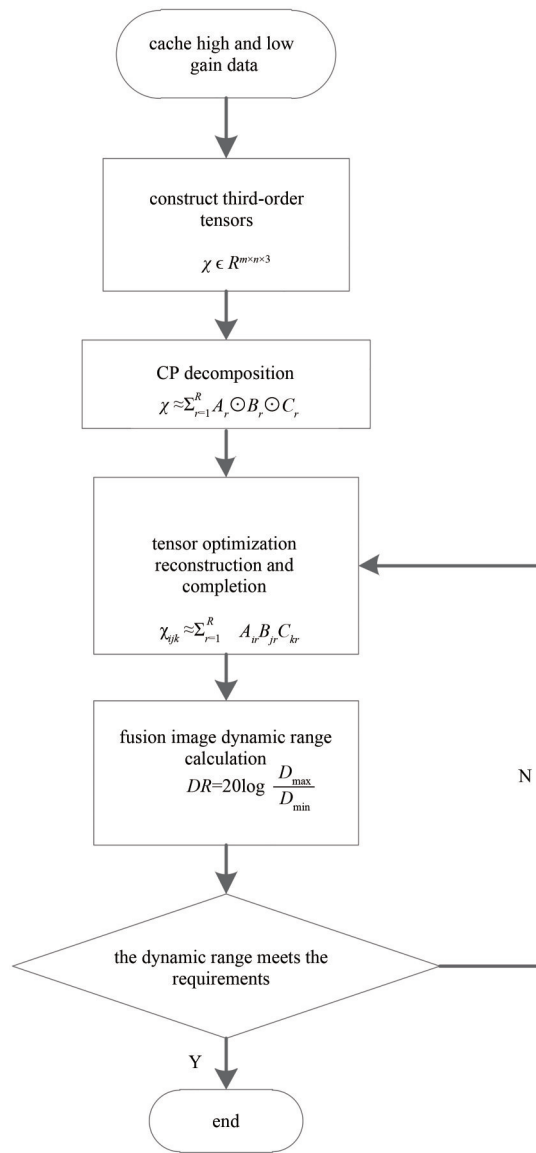


Fig.3 Flow chart of fusion algorithm based on tensor analysis
图 3 基于张量分析的融合算法流程图

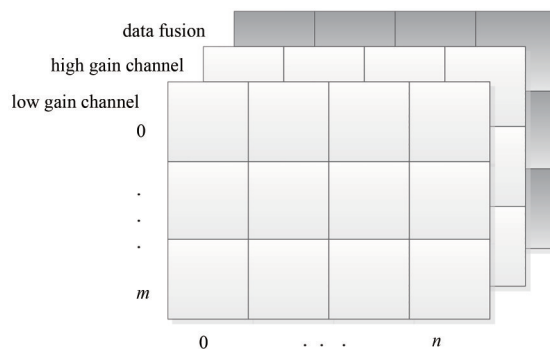


Fig.4 Tensor models for high and low gain images
图 4 高低增益图像的张量模型

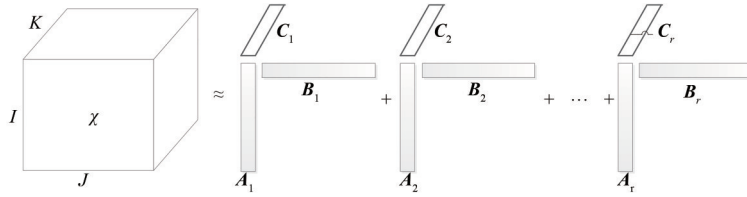


Fig.5 CP decomposition form of the third order tensor

图5 三阶张量CP分解形式

$$\chi \approx \sum_{r=1}^R A_r \circ B_r \circ C_r \quad (2)$$

式中 A_r 、 B_r 和 C_r 是 χ 的成分矩阵，且 $A_r \in R^I$ ， $B_r \in R^J$ ， $C_r \in R^K$ ，则式(2)可以写为：

$$\chi_{ijk} \approx \sum_{r=1}^R A_{ir} B_{jr} C_{kr} \quad (3)$$

式中 $i=1,2,\dots,I, j=1,2,\dots,J, k=1,2,\dots,K$ 。由于图像处理实时性要求及处理器资源的限制，公式中一般为近似等于，很难完全相等，因此也可以把张量分解理解为对高维数据的一种低秩逼近或特征提取。上一节将传感器图像构建成为一个三阶张量 $\chi \in R^{m \times n \times 3}$ ，只要通过张量分解计算出图像张量的成分矩阵 A_r 、 B_r 和 C_r ，根据式(3)近似求得该张量中的每一个元素，实现图像数据的预测和补全^[14-15]，得到一幅完整的融合图像数据。而CP分解最终可以表示为优化模型：

$$\min_{\hat{\chi}} \|\chi - \hat{\chi}\| \quad (4)$$

式中： χ 为已知张量； $\hat{\chi}$ 为待优化参数。针对式(4)所代表的优化问题，最常见的优化算法是梯度下降法，但是梯度下降法具有越靠近极值点收敛越慢的缺点，因此本设计引入拉格朗日乘数法作为张量CP分解的优化算法。

通常融合后图像数据是否满足要求主要通过两方面来评价，一是人眼的主观评价，一是使用图像的动态范围(Dynamic Range, DR)进行评价。动态范围定义为一幅图像像素的最大灰度值和最小灰度值之比，通常以对数表示，单位为dB。

$$DR = 20 \log \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \quad (5)$$

动态范围越大，图像所能表现的层次越丰富。将微光相机动态范围扩展的目标设定为超过30 dB，在引入拉格朗日乘数法后：

$$\hat{\chi} = [\lambda; \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}] = \sum_{r=1}^R \lambda_r a_r \circ b_r \circ c_r \quad (6)$$

式中 λ 为权重向量， $\lambda \in R^R$ 。将 \mathbf{B}, \mathbf{C} 固定，求解 \mathbf{A} ；再将 \mathbf{A}, \mathbf{C} 固定，求解 \mathbf{B} ；最后将 \mathbf{A}, \mathbf{B} 固定，求解 \mathbf{C} ，经过迭代，得到满足要求的 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 。

式(4)的优化问题就可简化为：

$$\min_{\hat{\lambda}} \|X_0 - \hat{A}(\mathbf{C} \circ \mathbf{B})^T\|_F \quad (7)$$

式中 $\hat{A} = A \text{diag}(\lambda)$ ，上述最小化问题的最优解为：

$$\hat{A} = X_0 [(\mathbf{C} \circ \mathbf{B})^T]^{-1} \quad (8)$$

最后将 \hat{A} 进行列标准化得到矩阵 \mathbf{A} ，同理求解 \mathbf{B} 和 \mathbf{C} 。

当得到一幅补全后的融合图像之后，通过计算其DR值是否满足要求，反复迭代直至结束，最终输出满足要求的图像数据。

3 实验结果

相机的大部分功能均在FPGA内部实现。FPGA产生LTN4625图像传感器的时序，驱动器按要求工作，并采集传感器输出的多路高速串行信号，从中解码出有效图像数据，缓存到DDR3中。同时FPGA利用流水线操作，实时完成基于张量分析的图像融合算法，最终可根据外部控制指令选择输出低增益数据、高增益数据或融合数据，由图采计算机显示。

相机进行成像测试，测试场地是室内，光照度约为 2 020 lx。图像融合效果如图 6 所示。图 6(a)为低增益图像数据，可以看出在当前光照条件下，低增益图像过暗，人眼基本无法辨认任何信息，通过计算得到此时图像的动态范围 $DR=5.2$ dB。图 6(b)为高增益图像数据，增益设置倍数为 30 倍，此时图像基本已经饱和，仅有若干细节处可勉强识别，计算得到此时图像的动态范围 $DR=11.4$ dB。图 6(c)为采用基于张量分析的图像融合算法得到的图像数据，可以看出，融合后图像的主观视觉效果显著增加，细节处显示较为清晰，灰度层级分布均匀，较好地提高了图像的视觉质量。计算得到此时图像的动态范围 $DR=54.7$ dB，动态范围提升明显。

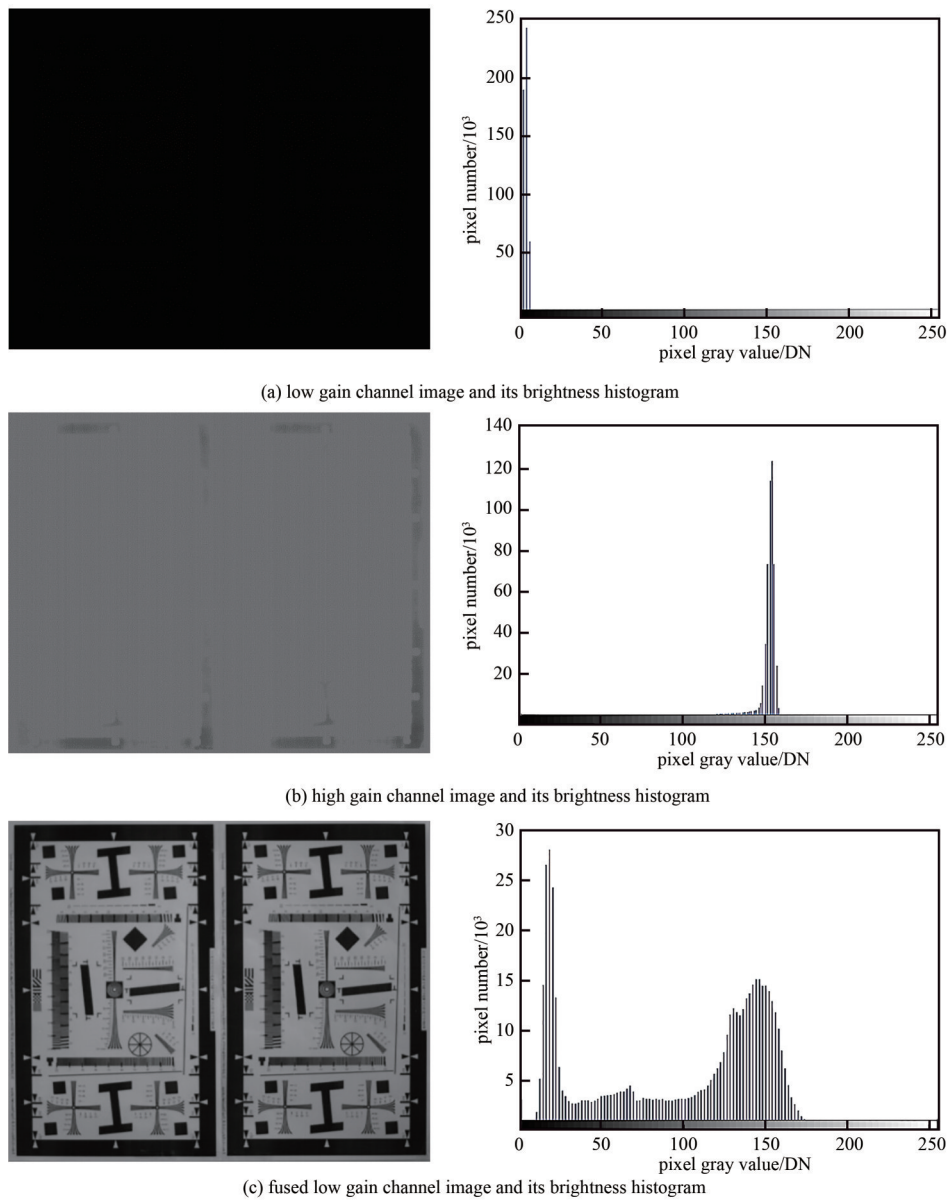


Fig.6 Imaging test results of low light level camera

图6 微光相机成像测试结果

4 结论

在分析 LTN4625 像素读出特点的基础上，综合考虑传感器输出高速图像数据采集和处理的要求，采用高性能 FPGA 作为控制核心，设计并实现了卷帘模式下高分辨力高动态范围的微光成像系统。基于 sCMOS 输出高低增益数据的特点，提出了一种基于张量分析的图像融合算法，通过张量的 CP 分解、重构和补全，得到了融合图像。成像结果表明，融合后的图像动态范围从低增益数据的 5.2 dB 和高增益数据的 11.4 dB 提高到了 54.7 dB，图像视觉效果提升明显，满足高分辨力高动态范围微光相机设计的需求。

参考文献:

- [1] 孙宏海,何舒文,吴培,等. 高动态科学级 CMOS 相机设计与成像分析[J]. 液晶与显示, 2017,32(3):240–248. (SUN Honghai, HE Shuwen, WU Pei, et al. Design and imaging analysis of high dynamic scientific CMOS camera system[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017,32(3):240–248.)
- [2] GROSS E,GINAT R,NESHER O. Low light level CMOS sensor for night vision systems[J]. Proceedings of SPIE, 2015,26(2):156–162.
- [3] 何舒文,王延杰,孙宏海,等. 高动态科学级 CMOS 相机系统设计[J]. 液晶与显示, 2015,30(4):729–735. (HE Shuwen, WANG Yanjie, SUN Honghai, et al. Design of high dynamic scientific CMOS camera system[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015,30(4):729–735.)
- [4] 王鹏,刘琦,徐磊. 微光探测器时序设计研究[J]. 航天返回与遥感, 2018,39(2):63–72. (WANG Peng, LIU Qi, XU Lei. Study on timing design of a low light sensor[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018,39(2):63–72.)
- [5] 于梦薇,刘洋,尹韬,等. 一种多线程 FPGA 时序驱动布线算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(6):1066–1070. (YU Mengwei, LIU Yang, YIN Tao, et al. A multithread FPGA timing-driven routing algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(6):1066–1070.)
- [6] SUNGHO S,SHINYA I,SATOSHI A, et al. Column-parallel correlated multiple sampling circuits for CMOS image sensors and their noise reduction effects[J]. Sensors, 2010,10(12):9139–9154.
- [7] 夏果,黄禅,吴骥,等. 微型光谱仪增益及读出噪声的测量方法[J]. 光学学报, 2017,37(1):63–68. (XIA Guo, HUANG Chan, WU Xiao, et al. Measurement method for gain and readout noise of micro spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2017,37(1):63–68.)
- [8] 覃征,鲍复明,李爱国,等. 数字图像融合[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2004. (QIN Zheng, BAO Fuming, LI Aiguo, et al. Digital image fusion[M]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 2004.)
- [9] KOLDA T G, BADER B W. Tensor decompositions and applications[J]. SIAM review, 2009,51(3):455–500.
- [10] 马友,王强,蔡长海. 基于张量分解的卫星遥感图像增强算法[J]. 科技与创新, 2018(22):43–47. (MA You, WANG Qiang, CAI Changhai. Satellite remote sensing image enhancement algorithm based on tensor decomposition[J]. Science and Technology & Innovation, 2018(22):43–47.)
- [11] 徐莉娟. 异源传感器图像融合关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2019. (XU Lijuan. Research on key technology of image fusion of different source sensor[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.)
- [12] 熊李艳,何雄,黄晓辉,等. 张量分解算法研究与应用综述[J]. 华东交通大学学报, 2018,35(2):120–128. (XIONG Lian, HE Xiong, HUANG Xiaohui, et al. A review of the research and application of tensor decomposition algorithms[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018,35(2):120–128.)
- [13] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2013. (ZHANG Xianda. Matrix analysis and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.)
- [14] KESHAVAN R H, MONTANARI A. Matrix completion from noisy entries[J]. Journal of Machine Learning Research, 2010,11(3):2057–2078.
- [15] GANDY S, RECHT B, ISAO Y. Tensor completion and low-rank tensor recovery via convex optimization[J]. Inverse Problem, 2011,27(2):25–43.

作者简介:

李馨(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为遥感探测 .email:lixin1990803@163.com.

唐琦(1984-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为遥感探测.

周海岸(1991-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为遥感探测.

南诺(1991-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为遥感探测.

冯兴泰(1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为遥感探测.

袁远(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为遥感探测.