

偏振-微光一体化EMCCD相机的设计与开发

那启跃 姜恺文 徐建东 沈吉 常维静

Design and development of polarization-low level light integrated EMCCD camera

NA Qiyue, JIANG Kaiwen, XU Jiandong, SHEN Ji, CHANG Weijing

引用本文:

那启跃, 姜恺文, 徐建东, 等. 偏振-微光一体化EMCCD相机的设计与开发[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 321–328. DOI: 10.5768/JAO202445.0201007

NA Qiyue, JIANG Kaiwen, XU Jiandong, et al. Design and development of polarization-low level light integrated EMCCD camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 321–328. DOI: 10.5768/JAO202445.0201007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[EMCCD集成偏振-微光一体化成像技术研究](#)

Research on polarization-low level integrated imaging technology based on EMCCD

应用光学. 2020, 41(2): 242–247 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201002>

[四通道微光偏振实时成像光学系统设计](#)

Optical system design of four-channel low light level polarization imaging

应用光学. 2019, 40(2): 334–341 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0205005>

[应用于一体化摄像机的自动聚焦搜索算法研究](#)

Study on auto-focusing searching algorithm applied to integrated camera

应用光学. 2018, 39(4): 483–490 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0402001>

[主三镜一体化离轴三反光学天线设计](#)

Design of off-axis three-mirror optical antenna based on integration of primary-tertiary mirror

应用光学. 2021, 42(1): 23–29 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101004>

[跟踪通信一体化接收光学系统设计](#)

Design of tracking communication integrated receiving optical system

应用光学. 2019, 40(6): 973–979 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601007>

[微光像增强器积分灵敏度单次测量误差分析](#)

Single test error analysis for integral sensitivity of low-light-level image intensifier

应用光学. 2020, 41(4): 791–795 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0404001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0321-08

偏振-微光一体化 EMCCD 相机的设计与开发

那启跃, 姜恺文, 徐建东, 沈吉, 常维静

(华东光电集成器件研究所, 江苏苏州 215163)

摘要: 多维度的信息获取是微光夜视探测技术未来的发展方向, 偏振成像是光电探测领域中的一种维度, 偏振相机的研制是研究偏振成像技术的前提。基于集成偏振阵列结构的电子倍增 CCD (electron multiplying CCD, EMCCD) 器件, 集合 EMCCD 微光探测的优势和偏振维度的探测功能, 论述了偏振-微光一体化相机的硬件电路设计和开发方案, 完成偏振维度信息与光强度信息一机同步采集作业, 并通过 FPGA 对原始数据进行偏振运算与图像传输处理。搭建测试系统, 对设计与开发的偏振样机进行性能测试。实验结果表明, 在温度 273 K、读出频率 2 MHz 条件下, 器件的读出噪声为 8.81e-, 动态范围约为 74 dB, 样机的消光比可达 50.95, 透过率可达 60.16%, 并可实时地选择性输出偏振度图像、偏振角图像、光强度与偏振融合图像, 极大地提高了夜间环境下对目标的识别探测能力。

关键词: EMCCD; 偏振成像; 微光; 一体化; 识别探测

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0201007](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201007)

Design and development of polarization-low level light integrated EMCCD camera

NA Qiyue, JIANG Kaiwen, XU Jiandong, SHEN Ji, CHANG Weijing

(East China Institute of Optoelectronic Integrated Device, Suzhou 215163, China)

Abstract: Multi-dimensional information acquisition is the future development direction of the low-level-light (LLL) night vision detection technology. Polarization imaging is a dimension in the field of photoelectric detection, and the development of polarization camera is the premise of studying polarization imaging technology. The electron multiplying CCD (EMCCD) device integrates polarization array structure, which has the advantage of LLL detection and the function of polarization dimension detection. Based on this device, the hardware circuit design and development scheme of polarization LLL integrated camera were discussed. The camera could complete the synchronous acquisition of polarization dimension information and light intensity information, and the original data was processed by polarization operation through FPGA. Then, the processed image data was transmitted to the PC. A test system was built to analyze the performance of the developed polarization camera. The experimental results show that, at 273 K temperature and 2 MHz readout frequency, the readout noise of the device is 8.81e-, the dynamic range is about 74 dB, the extinction ratio of the camera can reach 50.95, and the transmissivity can reach 60.16%. The camera can selectively output the degree of polarization image, the angle of polarization image, the image of light intensity and polarization fusion in real time, which greatly improves the recognition and detection ability of targets in the night environment.

Key words: electron multiplying CCD; polarization imaging; low level light; integration; recognition and detection

引言

偏振是光除了波长、振幅、相位以外的另一维

度信息, 偏振成像在传统强度成像基础上增加了偏振信息维度, 不仅能获取二维空间光强分布, 还

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-05-05

基金项目: 十四五装备预先研究联合基金 (627010408)

作者简介: 那启跃 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光电成像设计。Email: naqiyue1992@163.com

通信作者: 沈吉 (1988—), 男, 高级工程师, 主要从事光电器件与组件科研开发。Email: njustshenji@126.com

能获得图像的偏振信息^[1]。因而利用目标与背景间偏振特性的差异,可以凸显隐蔽在自然背景中的人造目标^[2]。在数字微光夜视与探测领域,EMCCD 器件因其高增益低噪声的特点,占有一席之地^[3-4]。在其光敏面上集成偏振阵列,可以克服实时性和集成度损失,制备出具备偏振-微光探测能力的 EMCCD 成像器件,进而为低照度下获取高分辨率、高时效的偏振信息^[5]提供技术条件。高灵敏度、多功能的相机设计研究,在微光夜视与探测技术的发展中,是不可缺失的技术手段^[6-7]。

本文针对具备偏振-微光探测能力的 EMCCD 成像器件特性,设计与开发在微光环境下可采集目标强度与偏振信息的相机。首先,分析集成偏振阵列结构的 EMCCD 成像器件的性能特点,研究其工作机理;其次,研究偏振-微光 EMCCD 相机的硬件开发^[8-11],通过 FPGA 对偏振解算进行硬件编程^[12-14],加速数据运算与处理速度;最后,进行偏振-微光成像的相关试验,测试样机性能参数。

1 集成偏振 EMCCD 器件的工作机理

集成偏振 EMCCD 器件的结构,是在行间转移 EMCCD 表面继续集成微纳偏振线栅单元^[15-16],属于分焦平面偏振探测器件^[17-18],每个光敏单元均对应一个偏振单元,如图 1 所示。自然光通过光学镜头入射到集成偏振成像器件光敏面,在微纳金属

线栅的作用下产生不同方向的偏振光,经 EMCCD 光电二极管的光电转换,把偏振光转换成电信号,电荷信号经转移驱动及电子倍增寄存器进行放大后,由输出放大器输出。

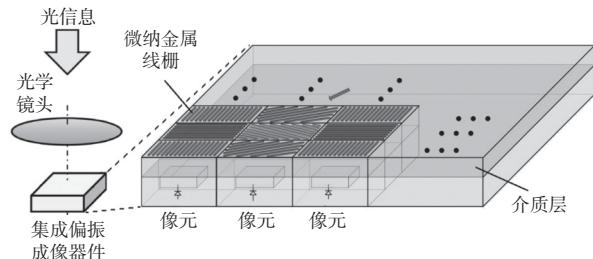


图 1 集成偏振 EMCCD 器件的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of integrated polarization EMCCD

1.1 行间转移 EMCCD 的结构特点

本文采用的行间转移 EMCCD 器件^[19]的结构框图见图 2,其成像区域共 1280(H)×1024(V) 光敏单元,左右两侧各有 20 个暗参考列,顶部和底部各有 8 个暗参考行。下方的读出结构左右对称,每侧依次为 660 个水平移位寄存器、10 个过扫描单元(其中最后 1 个为非破坏性浮置栅单元)、28 个水平移位寄存器、35 个拐角单元(其中 1 个为倍增选择单元)、660 个倍增寄存器单元和 5 个过扫描单元后,通过输出放大器输出倍增信号。非倍增信号在选择单元后通过 2 个过扫描单元(其中 1 个为非倍增选择单元)和输出放大器输出。

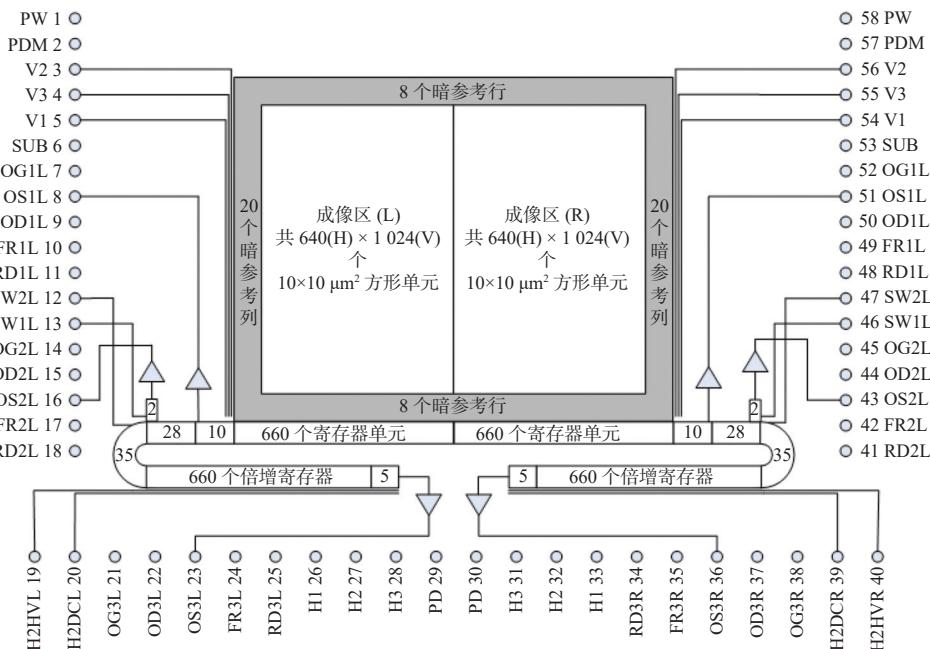


图 2 行间转移 EMCCD 结构框图

Fig. 2 Structure block diagram of interline transfer EMCCD

1.2 偏振阵列单元结构

在行间转移 EMCCD 器件的成像区、暗参考行和暗参考列上覆盖集成的偏振阵列, 每个光敏单元均对应一个偏振单元, 实现光敏单元对不同方向偏振光的探测, 如图 3 所示。与传统的 2×2 偏振

单元阵列不同, 该器件采用 4 个偏振方向加无偏振单元的阵列结构, 构成 3×3 偏振单元, 其结构包含中心的 1 个白光通道和周围 4 个偏振方向的 8 个偏振通道, 4 个偏振方向的偏振通道呈中心对称分布阵列^[20]。

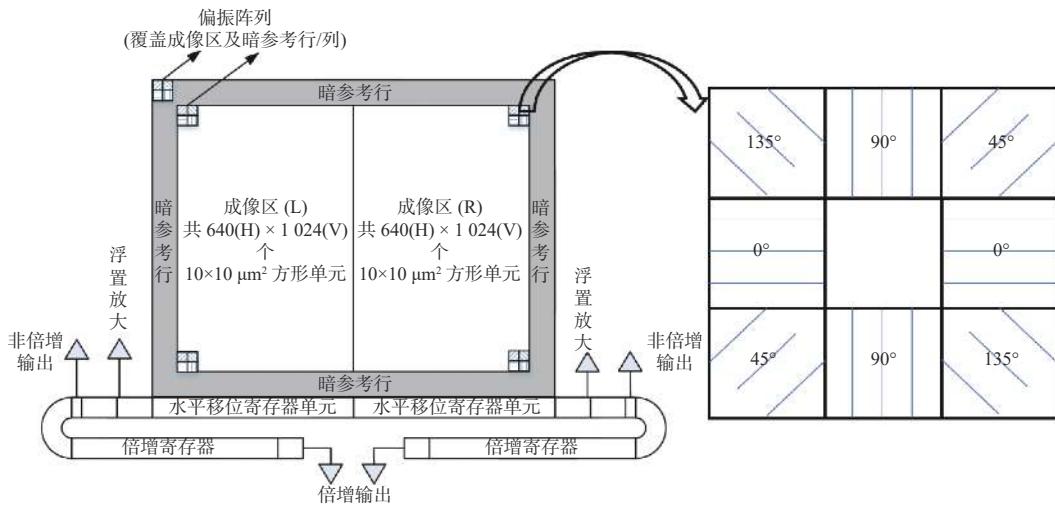


图 3 EMCCD 集成偏振结构及 3×3 阵列示意图

Fig. 3 Schematic diagram of EMCCD integrated polarization structure and 3×3 array

2 偏振-微光一体化 EMCCD 相机的样机设计

2.1 系统组成

偏振-微光一体化 EMCCD 相机样机由光学镜头、机械结构和电子学部分组成, 如图 4 所示, 其中电子学部分包括电源模块、驱动模块、FPGA 模块、接口模块以及 TEC 制冷电路模块。电源模块主要是把系统外部电源输入进行二次分配, 供给样机的各功能模块; 驱动模块主要包括集成偏

振 EMCCD 器件及其驱动电路和偏置电压电路、模拟前端与模数转换(AD 转换)电路等; 信号处理模块以 FPGA 为核心, 主要提供 EMCCD 工作时序、各模块电路的使能控制、通信收发控制等, 并搭配外围 DDR 存储芯片进行图像数据缓存与预处理、偏振成像算法实现、视频数据编码等功能; 接口模块主要包括视频接口电路、通信接口电路, 连接计算机以实现信息交互。计算机采用配有采集卡的工控机, 用于接收与显示相机输出的图像。

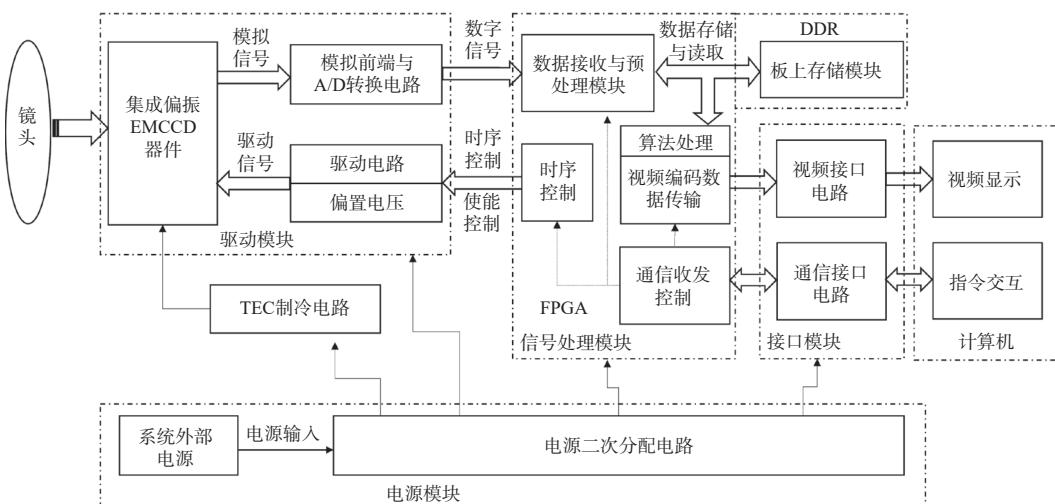


图 4 偏振-微光一体化 EMCCD 相机系统组成

Fig. 4 System composition of polarization-LLL integrated EMCCD camera

2.2 偏振成像阵列解算

基于集成偏振 EMCCD 器件的结构机理, 经 A/D 转换和预处理后的图像数据中, 包含白光通道和 4 个偏振方向 (0° 、 45° 、 90° 、 135°) 的灰度值信息。偏振图像原始数据模型如图 5 所示。

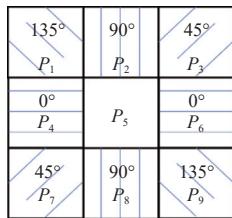


图 5 偏振阵列原始数据模型

Fig. 5 Raw data model of polarization array

基于该偏振数据模型优化后的 Stokes 矢量方程如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_5 \\ \frac{1}{2}(P_4 + P_6 - P_3 - P_7) \\ \frac{1}{2}(P_2 + P_8 - P_1 - P_9) \end{bmatrix} \quad (1)$$

在获取 S_0 、 S_1 、 S_2 后, 即可通过式(2)和式(3)得出线偏振度(F_{DOLP})和线偏振角(F_{AOLP}), 进而进行偏振成像。

$$F_{\text{DOLP}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (2)$$

$$F_{\text{AOLP}} = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_2}{S_1} \quad (3)$$

对式(2)和式(3)进行 FPGA 硬件实现, 涉及到的难点在于开方运算和反正切运算。坐标旋转数字计算机 (coordinate rotation digital computer, CORDIC) 算法是一种基于数字循环技术的迭代算法, 其基本思想是通过加减法和移位操作来逼近所需要旋转的角度, 进而完成三角函数的相关运算。对于电路中的 xilinx FPGA, 可以使用 Vivado 开发套件中 CORDIC IP 核, 实现开方与反正切函数的运算。

3 偏振-微光成像试验与分析

3.1 读出噪声的测试实验

器件的输出噪声由器件移位寄存器的转移噪声、输出放大器级噪声、输出级复位噪声和器件信号(由光照或热暗电流引起的)上的散粒噪声构成。信号中过扫位或哑元的均方根起伏, 与无信号电荷时输出电路的噪声特性相关联。因此, 测试出总噪声值 V_{Ntot} 与测试电路系统噪声值 V_{Nsys} , 按式(4)可计算出器件的读出噪声 V_{rn} 。

$$V_{\text{rn}} = \left(V_{\text{Ntot}}^2 - V_{\text{Nsys}}^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

具体的测试流程如下:

1) 测试被测器件与测试电路系统的总噪声

a) 在规定条件下, 采集 F 帧图像, 此时器件每一像元的噪声值 V_{ni} 可由式(5)计算:

$$V_{\text{ni}} = \frac{1}{G} \left(\frac{1}{F-1} \sum_{f=1}^F (V_{\text{oif}} - V_{\text{oi}})^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中: G 表示测试电路系统的增益; F 表示采集的图像帧数; V_{oif} 表示器件 i 像元第 F 帧的输出值; V_{oi} 表示 i 像元 F 帧的输出平均值。

b) 计算器件过扫位或哑元的均方根噪声值的平均值 V_{Ntot} , 可由式(6)计算:

$$V_{\text{Ntot}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_{\text{ni}} \quad (6)$$

式中: M 表示过扫位或哑元数目; V_{ni} 表示器件 i 过扫位或哑元的噪声值。

2) 测试电路系统的噪声

降低器件输出放大器的漏极工作电压 VDD 至 0 V, 器件其他引脚加载正常的工作状态, 按照测试流程 1) 的方法测出此时的噪声值 V_{Nsys} 。

3) 按照式(4)计算出器件的读出噪声。

基于上述测试流程, 调节测试电路系统的增益系数为 1, 设置输出光强度图像, 设定测试条件为温度 273 K, 读出频率 2 MHz。采集 2 帧图像, 分别读取图像第 100 行数据, 每帧图像每行过扫描数目为 8, 测试结果如表 1、表 2 所示, 其中数据位宽 12 bit。经计算可得, 读出噪声 $V_{\text{rn}} = 0.81\text{DN}$, 因器件的电荷-灰度值转换关系为 $10.88\text{e-}/\text{DN}$, 所以读出噪声测试结果也等价于 8.81e- 。

表 1 被测器件与测试电路系统的总噪声测试结果

Table 1 Total noise test results of device under test and test circuit system

图像	过扫描 <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
第1帧	126	126	130	132	128	128	130	124
第2帧	126	128	128	130	132	126	126	130

表 2 测试电路系统的噪声测试结果

Table 2 Noise test results of test circuit system

图像	过扫描 <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
第1帧	124	126	128	130	128	128	130	126
第2帧	126	124	130	128	132	124	128	128

3.2 动态范围的测试实验

动态范围是器件的饱和输出信号与读出噪声之比, 单位通常以 dB 表示。对于饱和输出信号的测量, 采用输出信号与曝光量的关系曲线进行测试, 具体流程如下:

- 1) 增加器件的曝光量并观察器件成像图形, 当器件成像图形严重变形和电荷转移效率明显变差时, 此时器件达到临界饱和, 设定此时的曝光量为测试最大曝光量;
- 2) 在最大曝光范围内逐步增加曝光量, 在每个曝光条件下采集 F 帧, 统计输出信号平均值, 并根据每个曝光量所得到的输出信号值与曝光量绘制关系曲线, 直至达到设定的最大曝光值, 输出信号值基本稳定为止;
- 3) 按照要求分别选择关系曲线的线性区和饱和区的统计点, 采用最小二乘法拟合直线, 两条直线的交点坐标即为器件的饱和输出信号 V_s 。

在测量出饱和输出信号后, 通过式(7)即可计算出动态范围 D_R :

$$D_R = 20 \lg \left(\frac{V_s}{V_m} \right) \quad (7)$$

基于上述测试流程, 调节测试系统输出光强度图像, 同样设定环境温度 273 K、读出频率 2 MHz 的条件。在均匀光源下, 增加积分时间 T 改变入射曝光量, 测试结果如图 6 所示。可得饱和输出信号 $V_s = 3950$ DN, 进而可以计算出动态范围 $D_R \approx 74$ dB。

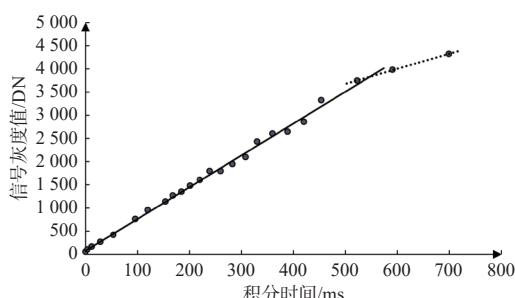


图 6 输出信号灰度值与积分时间的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between gray value of output signal and integration time

3.3 信噪比的测试实验

信噪比即为在规定的光照条件下, 器件的输出信号与读出噪声之比, 通常以 dB 表示, 信噪比的计算如式(8)所示:

$$F_{\text{SNR}} = 20 \lg \left(\frac{V_o}{V_m} \right) \quad (8)$$

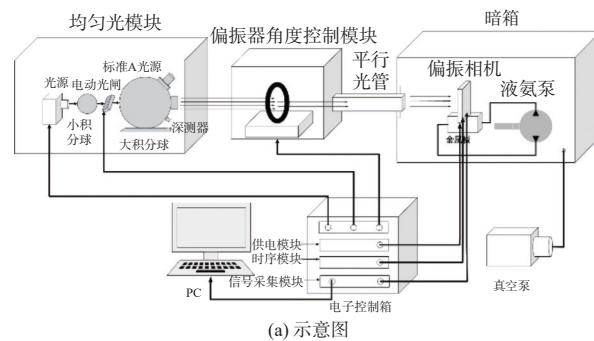
具体的测试流程如下:

- 1) 在规定的均匀光照条件下, 测试器件的输出信号 V_o ;
- 2) 测试出器件规定的均匀光照条件下的读出噪声 V_m ;
- 3) 按照式(8)计算器件的信噪比 F_{SNR} 。

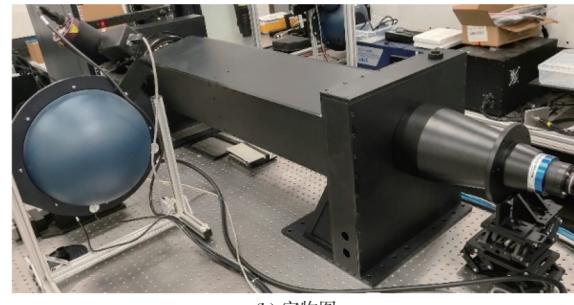
基于上述测试流程, 调节测试系统输出光强度图像, 设定环境温度 273 K、读出频率 2 MHz 的条件, 设置均匀光照度为 10 lx, 积分时间为 250 ms, 信噪比的测试结果为 $F_{\text{SNR}} \approx 68$ dB。

3.4 偏振消光比及透过率的测试实验

基于开发的偏振样机, 设计如图 7 所示的偏振性能参数测试系统。均匀光模块通过积分球产生平行光源, 偏振角度控制模块实现对平行光源的起偏, 偏振光经平行光管入射到成像样机光敏面, 相机得到的图像数据传输到计算机进行测试分析。



(a) 示意图



(b) 实物图

图 7 偏振性能参数测试系统

Fig. 7 Polarization performance parameter test system

根据测试系统, 对样机的偏振消光比与透过率进行测量, 具体方法如下: 通过偏振器角度控制模块改变入射到器件表面偏振光的方向, 分别为 0°、45°、90°、135°, 调节光源模块使器件白光通道像素输出达到约饱和值的 90%, 样机采集当前的原始像素数据进行参数计算, 偏振图像的局部区域如图 8 所示。白光通道及 4 个偏振方向像素灰度平均值如表 3 所示, 图像灰度值的位宽为 12 bit。

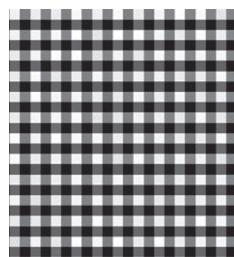


图 8 偏振角度 90°时的原始数据成像显示

Fig. 8 Imaging display of raw data at polarization angle of 90°

表 3 白光通道及 4 个偏振方向像素灰度平均值

Table 3 Average gray values of pixels in white light channel and four polarization directions

像素类型	偏振光方向			
	0°	45°	90°	135°
本底(P_0)	128	128	128	128
白光(I)	3685	3680	3684	3686
0°偏振	2268	1224	170	1224
45°偏振	1218	2265	1222	171
90°偏振	170	1215	2270	1220
135°偏振	1226	169	1220	2266
偏振消光比	50.95238	52.12195	51.00000	49.72093
偏振光透过率	0.601631	0.601633	0.602362	0.600899

偏振消光比及透过率的计算如式(9)和式(10):

$$F_{\text{PER}} = \frac{P_{\max} - P_0}{P_{\min} - P_0} \quad (9)$$

$$T = \frac{P_{\max} - P_0}{I - P_0} \quad (10)$$

式中: F_{PER} 表示偏振消光比; T 表示偏振光透光率; P_{\max} 表示透过方向的像素灰度值; P_{\min} 表示衰减方向的像素灰度值; P_0 表示图像本底灰度值; I 表示白光通道像素灰度值。整个探测器件的消光比和透过率可用 4 个偏振方向的计算结果平均值得出, 即消光比为 50.95, 透过率为 60.16%。

通过式(9)和式(10)可分别求出 0°、45°、90°、135° 四个偏振方向的消光比与透过率, 计算结果如表 3 所示, 其中 0° 和 90° 互为透过方向和衰减方向, 45° 和 135° 互为透过方向和衰减方向。

3.5 偏振外场成像实验

在 FPGA 内进行偏振成像算法的实现后, 选择在晴朗月光夜空环境下进行相关实验, 环境照度在 10^{-1} lux 量级。样机可直接向计算机输出偏振度

图像、偏振角图像、强度与偏振信息的融合图像, 成像结果如图 9 所示。从实验得到的图像中可以看出: 光强度成像无法识别车辆目标, 偏振度图和偏振角图可以提炼出车辆的轮廓、表面状态、纹理结构等细节信息, 经过强度与偏振信息融合的图像细节信息更加丰富, 可以有效区分背景与目标。



Fig. 9 Polarization imaging demonstration in external scenes

4 结论

偏振-微光样机的研制, 可为多维度微光夜视技术的研究提供一种技术手段。本文基于集成 3×3 偏振阵列结构的 EMCCD 器件设计开发的偏振-微光成像样机, 具备单光路、单探测器、系统一体化、实时性等特点, 同时消光比和透过率性能得到提高, 可实时探测目标与背景反射或透射的偏振信息, 并进行重组与增强, 在微光环境下可大幅提高目标与背景的区分度, 实现对目标的有效探测识别。

参考文献:

- [1] 李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.
LI Shujun, JIANG Huilin, ZHU Jingping, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection[J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 803-809.
- [2] 罗海波, 张俊超, 盖兴琴, 等. 偏振成像技术的发展现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 109-118.

- LUO Haibo, ZHANG Junchao, GAI Xingqin, et al. Development status and prospects of polarization imaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 109-118.
- [3] 吴昊, 伍园, 伍伟, 等. 数字微光夜视器件技术研究[J]. 光电子技术, 2022, 42(1): 72-78.
- WU Hao, WU Yuan, WU Wei, et al. Study on the digital low light level night vision device technology[J]. Optoelectronic Technology, 2022, 42(1): 72-78.
- [4] WU X G, LIU J G, ZHOU H D, et al. Spaceborne low light imaging based on EMCCD and CMOS[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 205-210.
- [5] 陈远金, 张猛蛟, 戴放, 等. EMCCD集成偏振-微光一体化成像技术研究[J]. 应用光学, 2020, 41(2): 242-247.
- CHEN Yuanjin, ZHANG Mengjiao, DAI Fang, et al. Research on polarization-low level integrated imaging technology based on EMCCD[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(2): 242-247.
- [6] 何家维, 何昕, 魏仲慧, 等. 高灵敏度EMCCD导航相机的设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 3019-3027.
- HE Jiawei, HE Xin, WEI Zhonghui, et al. Design of high-sensitivity EMCCD navigation camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(12): 3019-3027.
- [7] 何家维, 何昕, 魏仲慧, 等. 一体化EMCCD微光相机的设计[J]. 红外, 2014, 35(10): 14-19.
- HE Jiawei, HE Xin, WEI Zhonghui, et al. Design of integrated EMCCD camera for low-light detection[J]. Infrared, 2014, 35(10): 14-19.
- [8] 刘玲钰. 多抽头EMCCD时序控制及非均匀性校正研究[D]. 成都: 中国科学院大学, 2020.
- LIU Lingyu. Research on timing control and nonuniformity correction of multi-channel electronic multiplication CCD[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [9] 刘玲钰, 王明富, 刘恩海. 多抽头EMCCD相机时序控制及像元合并技术[J]. 半导体光电, 2020, 41(3): 420-425.
- LIU Lingyu, WANG Mingfu, LIU Enhai. Timing control and pixel merger technology of multi-tap EMCCD camera[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(3): 420-425.
- [10] WU C Y, GU G H, CHEN Q, et al. Design of a high-performance EMCCD imaging system[C]. Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. Kunming, China: SPIE, 2021: 11763.
- [11] 杨俊超. 高性能EMCCD成像系统关键技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- YANG Junchao. Key technology of high performance EMCCD imaging system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [12] 刘奥林, 黄嵩人. 基于CORDIC算法的反正切函数IP核的设计与优化[J]. 中国集成电路, 2022, 31(5): 32-36.
- LIU Aolin, HUANG Songren. Design and optimization of arctangent function IP core based on CORDIC algorithm[J]. China Integrated Circuit, 2022, 31(5): 32-36.
- [13] SAYED W S, ROSHDY M, SAID L A, et al. CORDIC-based FPGA realization of a spatially rotating translational fractional-order multi-scroll grid chaotic system[J]. Fractal and Fractional, 2022, 6(8): 432.
- [14] 刘小会, 许蕾, 刘海颖, 等. 基于CORDIC改进算法的反正切函数在FPGA中的实现[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(11): 103-107.
- LIU Xiaohui, XU Lei, LIU Haiying, et al. Realization of arc-tangent function based on improved CORDIC algorithm in FPGA[J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(11): 103-107.
- [15] 关乐, 王忠旭, 李世奇, 等. 亚波长纳米金属光栅偏振聚光器设计[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(6): 70-74.
- GUAN Le, WANG Zhongxu, LI Shiqi, et al. Design of focusing sub nanometer metal grating polarizer[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(6): 70-74.
- [16] 杨江涛, 王健安, 王银, 等. 亚波长金属光栅偏振器制备技术研究[J]. 红外技术, 2021, 43(1): 8-12.
- YANG Jiangtao, WANG Jianan, WANG Yin, et al. Fabrication technology of a subwavelength metal grating polarizer[J]. Infrared Technology, 2021, 43(1): 8-12.
- [17] 罗海波, 刘燕德, 兰乐佳, 等. 分焦平面偏振成像关键技术[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(1): 8-13.
- LUO Haibo, LIU Yande, LAN Lejia, et al. Key technologies of polarization imaging for division of focal plane polarimeters[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(1): 8-13.
- [18] GOUDAIL F, LI X B, BOFFETY M, et al. Precision of retardance autocalibration in full-Stokes division-of-focal-plane imaging polarimeters[J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5410-5413.
- [19] 陈远金, 常维静, 刘庆飞, 等. 1 280×1 024 EMCCD纵向抗光晕设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 265-270.
- CHEN Yuanjin, CHANG Weijing, LIU Qingfei, et al.

- Design of 1 280×1 024 vertical antiblooming EMCCD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 265-270.
- [20] 梁宛玉, 许洁, 戴放, 等. 固态微光实时偏振成像集成技术[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 578-586.
LIANG Wanyu, XU Jie, DAI Fang, et al. Real-time polarization imaging integrated technology for solid-state low-light imaging[J]. Chinese Optics, 2021, 14(3): 578-586.