

EBAPS的调制传递函数测试系统

周潮虹 钱芸生 张景智

Modulation transfer function testing system for EBAPS

ZHOU Chaohong, QIAN Yunsheng, ZHANG Jingzhi

引用本文:

周潮虹, 钱芸生, 张景智. EBAPS的调制传递函数测试系统[J]. 应用光学, 2024, 45(5): 992–1000. DOI: 10.5768/JAO202445.0503001

ZHOU Chaohong, QIAN Yunsheng, ZHANG Jingzhi. Modulation transfer function testing system for EBAPS[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(5): 992–1000. DOI: 10.5768/JAO202445.0503001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0503001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光电成像系统动态调制传递函数测量装置

Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 592–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401004>

航空光电成像系统像移补偿技术研究

Image motion compensation technology of aerial photoelectric imaging system

应用光学. 2022, 43(3): 424–429 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0302001>

基于三色LCTF的自然感彩色微光EBAPS成像系统

Natural color low-level-light EBAPS imaging system based on three-color LCTF

应用光学. 2022, 43(6): 1044–1053 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604002>

应用波像差理论计算Kirkpatrick-Baez系统的调制传递函数

Calculating MTF of Kirkpatrick-Baez system by wave aberration theory

应用光学. 2020, 41(5): 904–910 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501005>

AOTF成像光谱仪声光晶体光谱传递函数的研究

Study on spectral transfer function based on dual AOTF acousto-optic crystal

应用光学. 2019, 40(2): 202–209 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201004>

基于EBAPS的国产成像电路研制

Development of domestic imaging circuit based on EBAPS

应用光学. 2023, 44(3): 668–676 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0305002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 05-0992-09

EBAPS 的调制传递函数测试系统

周潮虹, 钱芸生, 张景智

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 电子轰击有源像素传感器 (electron bombarded active pixel sensor, EBAPS) 是一种新型的真空-固体混合型微光夜视器件, 而调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 作为 EBAPS 的性能参数之一, 能够反映成像系统对不同频率成分的传递能力, 但目前国内缺少相应的测试手段。因此, 为了表征并评价 EBAPS 的成像质量, 基于像增强器狭缝法测试 MTF 的原理, 设计并搭建了一套 EBAPS 的 MTF 测试系统。通过驱动 EBAPS 器件, 利用 USB 接口将采集到的数据传输至上位机进行图像分析, 对狭缝图像进行处理获得线扩散函数 (line spread function, LSF), 经离散傅里叶变换后得到相应的调制传递函数曲线。在狭缝靶标处照度为 2×10^{-2} lx 时, 一定范围内随着电压升高, EBAPS 的 MTF 先升高后降低, 且在外加 -1 000 V 时取得最大值。在光成像模式下, 微调狭缝与传感器成像面的相对位置, 连续 5 次测试得到几个重要频率点的 MTF 值的标准差均低于 0.01, 稳定性较好。

关键词: 调制传递函数; 电子轰击; 线扩散函数; 有源像素传感器; 成像质量

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0503001

Modulation transfer function testing system for EBAPS

ZHOU Chaohong, QIAN Yunsheng, ZHANG Jingzhi

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Electron bombarded active pixel sensor (EBAPS) is a new type of vacuum solid hybrid low light night vision device, and the modulation transfer function (MTF), as one of the performance parameters of EBAPS, can reflect the transmission ability of imaging systems to different frequency components. However, there is currently a lack of corresponding testing methods in China. Therefore, in order to characterize and evaluate the imaging quality of EBAPS, a MTF testing system for EBAPS was designed and built based on the principle of image intensifier slit method for testing MTF. By driving the EBAPS device and using a USB interface to transmit the collected data to the upper computer for image analysis, the slit image was processed to obtain the line spread function (LSF), and the corresponding modulation transfer function curve was obtained through discrete Fourier transform. When the illumination at the slit target was 2×10^{-2} lx, within a certain range, as the voltage increased, the MTF of EBAPS first increased and then decreased, and reached its maximum value when -1 000 V was applied. In the light imaging mode, by fine-tuning the relative position between the slit and the sensor imaging surface, the standard deviation of MTF values for several important frequency points obtained from 5 consecutive tests was less than 0.01, indicating good stability.

收稿日期: 2023-10-10; 修回日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金“叶企孙”科学基金项目 (U2141239)

作者简介: 周潮虹 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事微光成像器件测试技术研究。E-mail: zhouchaohong2021@163.com

通信作者: 钱芸生 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事微光与红外成像器件与系统及相关测试技术、原位测试与分析、光电测试、图像处理和仿真研究。E-mail: yshqian@mail.njust.edu.cn

Key words: modulation transfer function; electronic bombardment; line spread function; active pixel sensor; imaging quality

引言

微光夜视技术是研究在夜天光等不良环境条件下,对微弱目标进行光电转换、增强、处理和显示的一门高新技术,其核心是微光像传感器^[1]。其中,电子轰击有源像素传感器(EBAPS)作为一种真空-固体混合型微光探测器件,相比于像增强器^[2],增加了数字化输出的功能。与 ICCD 相比^[3],其结构更加简单,且具有高增益、高 MTF 的特性^[4-5]。

然而,目前对于 EBAPS 器件性能测试的研究还比较少,且缺乏有效的器件性能表征系统,但已经引起了高度重视。2021 年,南京理工大学研制了一套 EBAPS 器件的光谱响应和成像性能测试系统,其中包含了分辨率、信噪比、动态范围、光响应非均匀性等指标^[6],但缺少调制传递函数(MTF)的测试方法。MTF 作为像质评价的指标,能够客观和全面地描述系统的成像质量,而国内基本还未出现对于 EBAPS 器件 MTF 的相关研究和测试系统,一定程度上会影响 EBAPS 器件图像综合性能的表征和优化。

因此,为了解决目前国内缺乏 EBPAS 的 MTF 测试手段的关键问题,本文设计了一套 EBAPS 的 MTF 测试系统。首先搭建了一套光源系统和光源衰减系统,再基于 MTF 测试的基本原理,采用狭缝测试法,采集到 EBAPS 器件的输出图像,编写 C++软件分析图像的灰度分布求得线扩散函数(LSF),经傅里叶变换后获取到调制传递函数的曲线,为评估和提升 EBAPS 器件的成像质量提供实验支撑。

1 基本原理

1.1 EBAPS 基本结构与工作原理

EBAPS 器件一般采用近贴聚焦结构,用背部减薄的且对电子敏感的有源像素传感器(active pixel sensor, APS)取代传统的荧光屏,并去掉了微通道板,减少了成像链的环节,其基本结构如图 1 所示,主要包括入射窗、光电阴极、真空高压装置和 APS 芯片等^[7]。在器件的整个工作过程当中,外界微弱光信号中的光子透过入射窗到达光电阴极。在光电阴极的表面,光子会发生外光电效应从而转换成光电子,光电阴极和电子倍增层之间

加有高压电场,电子在电场的作用下加速并轰击在 APS 芯片的电子倍增层上,在电子轰击半导体增益机制的作用下产生大量的二次电子,实现电子的倍增,并被 APS 芯片上的结区收集,最终通过读出电路输出,实现微弱光信号的探测^[8]。

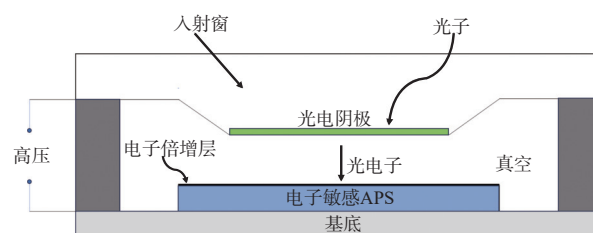


图 1 EBAPS 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of EBAPS

1.2 MTF 测试原理

1.2.1 MTF 基本原理

对于一个复杂的光信号,可以将其视为由若干个不同频率的光信号组成,经过傅里叶变换后,信号被分解成不同频率的正弦函数。同时由于光学成像系统的线性和空间不变性^[9],目标物成像前后的频率 f 是不会改变的,但对比度会下降,并且随着频率的增大而减小,这种关系被称为光学系统的 $\text{光学传递函数 (optical transfer function, OTF)}$ 。如果将光学传递函数 $O(f)$ 用一个复函数来表示,它可以由幅值 $M(f)$ 和相位 $P(f)$ 两部分组成:

$$O(f) = M(f)e^{-iP(f)} \quad (1)$$

式中幅值 $M(f)$ 即为调制传递函数。对于其实际意义,以物方输入为正弦函数的光学系统为例,物方的光强度为正弦分布,那么像方的光强度仍然为正弦分布,且二者的平均亮度相同,成像前后的空间频率也保持不变。其中对比度 $C(f)$ 定义为在空间频率 f 下,正弦信号的振幅和平均值的比值:

$$C(f) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

式中 $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别是正弦信号振幅的最大值和最小值。那么该光学成像系统的 MTF 就可表示为像函数的对比度 $C'(f)$ 与物函数的对比度 $C(f)$ 之比,如式(3)所示,它是随空间频率 f 变化的函数。

$$M(f) = \frac{C'(f)}{C(f)} \quad (3)$$

由于物经过成像系统后对比度会降低,那么

MTF 的值总是小于 1。在低频空间中,光学系统的 MTF 值会接近于 1,此时能反映一个光学系统对于物体细节的还原能力,频率越高,MTF 值会随之降低,直到降至 0,此时便能反映此成像系统对于极限频率的分辨能力^[10]。评价一个光学成像系统成像质量的好坏,各个频率段的 MTF 值都至关重要。

1.2.2 MTF 测试方法

对于调制传递函数,目前最常用的测试方法主要可分为物像频谱对比法和傅里叶分析法两种。其中物像频谱对比法是一种直接测试 MTF 的方法^[11],由于一个信号可以分解为一系列不同频率的正弦信号,因此外界的输入图像就可以用不同频率的正弦函数来代替。那么,当原始图像信号中某一频率的正弦信号通过一个线性不变成像系统后,输出信号的幅值会降低,再根据式(2)和式(3)对物和像的对比度进行比较,便能得到某一频率下的 MTF 值^[12]。这种方法的优点便是光信息充足,而且不用考虑衍射、像差等问题;但是它一次只能测试一个频率点下的 MTF 值,因此需要测试在不同空间频率下的原始图像信号,再根据各个频率下的 MTF 值进行曲线拟合,才能获得一条完整的调制传递函数曲线。采用这种方法进行 MTF 测试需要很大工作量以及花费大量时间,测试效率太低。

因此,本文介绍的 MTF 测试系统采用的是傅里叶分析法,这种方法通常是对一个目标物靶标进行成像,被后端的图像采集器件采集之后,再进行处理和变换,便可获得该成像系统的调制传递函数^[13],常见的测试靶标主要有针孔、刃边、狭缝等^[14]。

由于狭缝测试法能够获得足够的亮度信息,测试的流程也较为简单,效率较高,并且能控制衍射带来的影响,因此本文测试 EBAPS 器件的调制传递函数采用的方法是狭缝测试法。狭缝法又可分为垂直狭缝和倾斜狭缝,倾斜狭缝是与探测器像素排列存在夹角,每行狭缝像质心位置就会不同,那么每一行的像素位置与该行的狭缝像质心位置的距离就不是整数^[15],这样就可以对灰度分布插值进行亚像素采样,此时就可以获得更高的采样密度,减少混频效应的产生^[16],提高测试的准确性。而垂直狭缝法需要狭缝与器件像素排列在固定位置上对齐^[17],这样每个像素点均为整数位置,导致

最后输出线扩散函数的采样点数减少,影响最终 MTF 的准确性。因此,为了保证测试的准确性,针对不同像元尺寸的 EBAPS 器件,分别计算所适用的狭缝宽度,并采用相应宽度的狭缝靶标进行测试,以此满足采样定理的要求。同时,在采用垂直狭缝法时,针对线扩散函数存在噪声点以及边缘突起的问题,初步绘制出线扩散函数后,在保留原始数据的前提下对其进行曲线修正。首先减除背景亮度的影响,再采用高斯函数和指数函数结合的方法对线扩散函数进行曲线拟合,提高 LSF 曲线的平滑性。

在线性不变系统当中,狭缝靶标在像面上的像 $I'(x')$ 可以看作是线扩散函数 $L(x)$ 与物函数 $I(x)$ 的卷积,可以表示为

$$I'(x') = I(x) * L(x) \quad (4)$$

根据光学传递函数的定义,其在数值上等于输出函数的傅里叶变换与输入函数的傅里叶变换的比值,将式(4)代入其中,便可得到光学传递函数与物、像的傅里叶变换之间的关系:

$$O(x) = \frac{F(I'(x'))}{F(I(x))} = \frac{F(I(x) * L(x))}{F(I(x))} = \frac{F(I(x)) \cdot F(L(x))}{F(I(x))} = F(L(x)) \quad (5)$$

根据式(1)的关系对 OTF 取模并归一化处理,就可以得到 MTF 与 LSF 之间的计算表达式:

$$M(f) = \frac{|O(x)|}{|O(0)|} = \frac{|F(L(x))|}{|F(L(0))|} \quad (6)$$

式中: x 是空间域的位置,单位是 mm; f 则是频域坐标下的频率,即为 MTF 曲线的横坐标,单位是 lp/mm。由于 MTF 曲线是将空间频率为 0 的点作为参考值,即记为 1,且 MTF 值是随着频率的升高而下降的,将其他频率点下的 MTF 值以这个点为基准进行归一化处理,因此最终 MTF 曲线的纵坐标范围是 0~1。

2 测试系统设计

基于上述的测试原理,设计并搭建了一套 EBAPS 器件调制传递函数的测试系统。本章节将根据 EBAPS 器件的 MTF 测试需求设计出整体的测试系统硬件平台^[18],对其中的各个子系统和光学组件进行分析和介绍,并编写软件程序对相关硬件进行控制,完成图像采集和数据的处理,其整个测试系统结构示意图如图 2 所示。

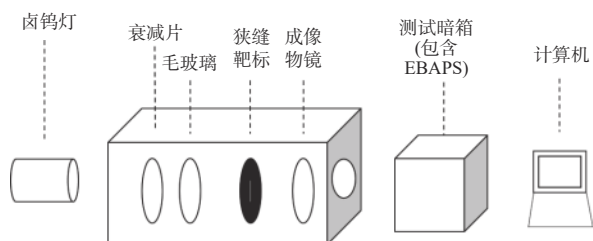


图2 EBAPS 的MTF测试系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of MTF testing system of EBAPS

2.1 硬件组成

EBAPS 器件的 MTF 测试硬件平台如图 3 所示, 主要包括卤钨灯光源、光源衰减系统、狭缝靶标、成像物镜、EBAPS 器件等。

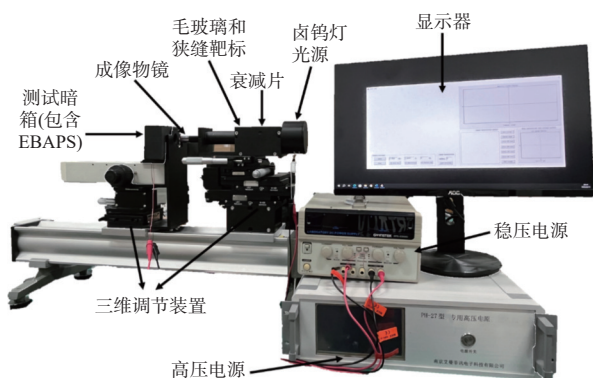


图3 EBAPS 的MTF测试硬件实物图

Fig. 3 Physical drawing of MTF testing hardware for EBAPS

卤钨灯光源由 10 W 电源驱动, 发出的光亮度要符合测试实验的要求, 既不能过高也不能过低。亮度过高会导致采集到的图像中狭缝处过曝, 亮度过低可能无法获取足够的亮度信息, 最终都会影响测试结果的准确性。如果让光源直接照射在狭缝靶标上, 无论光源的功率降到多低, 其发出的光强度仍然会过高, 无法达到实验的要求。因此, 在狭缝靶标和光源之间加了一个光源衰减系统, 并使光源均匀照射在狭缝靶标上。

狭缝靶标是采用直径为 30 mm、厚度为 0.05 mm 的圆形铝片作为基底, 运用激光刻蚀出 10 mm 长、75 μm 宽的通光狭缝。由于狭缝自身的宽度也会造成 MTF, 因此需要狭缝够窄以致不影响测试器件频率范围内的 MTF^[19]。为了消除缝宽的影响, 测试结果应除以滤波函数 $G(\mu)$:

$$G(\mu) = \frac{\sin(\pi\beta d\mu)}{\pi\beta d\mu} = \text{sinc}(\beta d\mu) \quad (7)$$

式中: μ 为频率; β 为系统的横向放大率; d 为狭缝宽

度。由于器件前端的成像物镜为 3 倍, 因此横向放大率为 0.333。而待测器件的像元尺寸为 12.5 $\mu\text{m} \times 12.5 \mu\text{m}$, 其极限分辨率不大于 40 lp/mm, 滤波函数第一个零点位置的频率需要大于待测器件的极限分辨率, 因此狭缝宽度的最大值应该为 75 μm , 所用狭缝宽度在其范围之内。另外在实际测量中, 狭缝必须满足一定宽度要求才能有足够的光能量以便测量, 并且根据衍射产生的条件, 狭缝宽度接近甚至小于光波长时, 衍射现象十分明显。假设光波长为 400 nm, 狭缝经过成像物镜后在传感器像面上的宽度为 25 μm , 因此该尺寸的狭缝造成的衍射效果影响较小。同时根据奈奎斯特采样定理, 频率域上的采样频率必须大于等于 MTF 曲线最高频率的两倍, 那么成像在传感器成像面上的狭缝宽度必须大于等于传感器像元尺寸的两倍, 此时能够获得更多的图像信息, 且得到的 MTF 曲线不会发生频谱混叠。因此, 宽度为 75 μm 的狭缝能够满足测试的要求。

同时, 实验室自主研制的 EBAPS 专用高压电源可以为 EBAPS 器件提供 -1 400 V~0 的稳定负高压, 使 EBAPS 器件在测试过程中工作在电子轰击成像模式下^[20], 并且 EBAPS 驱动电路和图像采集模块可以为后续的图像处理及结果分析提供支持。通过成像物镜后, 从狭缝出射的均匀光照射到 EBAPS 器件的光电阴极面上, 光学图像信息便会转换成微弱的电子图像信号。电子在高压电场的加速下直接轰击在电子倍增层上, 产生大量的二次电子, 实现电子倍增, 最终这些电子被光电二极管收集, 并通过读出电路转换成数字信号输出, 在上位机中进行图像显示以及后续的处理和计算。

2.2 软件设计

在完成 MTF 测试系统的硬件平台搭建之后, 需要有配套的软件来实现对硬件设备的控制、图像的接收和显示、结果计算和保存。本次 EBAPS 的 MTF 测试系统的软件平台是基于 Visual Studio 2013 开发环境, 利用 MFC(Microsoft foundation classes)编写而成的。通过 MFC 进行程序编写和界面设计, 实现在一个界面上完成 EBAPS 器件的参数设置, 图像实时采集、传输和显示, ROI 区域的选取, LSF 曲线的获取, MTF 结果的显示和测试结果保存等功能, 其完整的测试界面如图 4 所示。

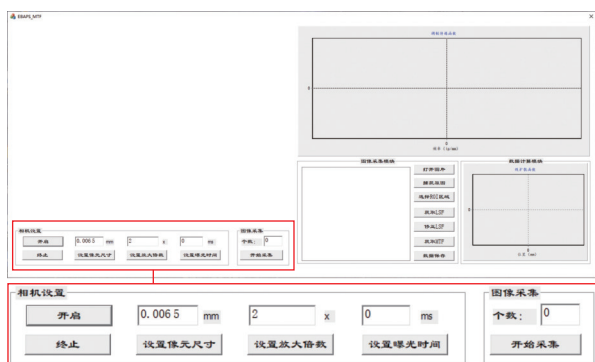


图 4 MTF 测试系统程序界面

Fig. 4 Program interface of MTF testing system

在测试过程中,软件界面左上角会实时显示 EBAPS 的输出图像,并捕获原图进行在线测试,选取感兴趣区域(ROI)计算线扩散函数并进行修正,经傅里叶变换后获得调制传递函数,同时也可以打开本地图片进行同样的操作,整套软件的测试流程如图 5 所示。

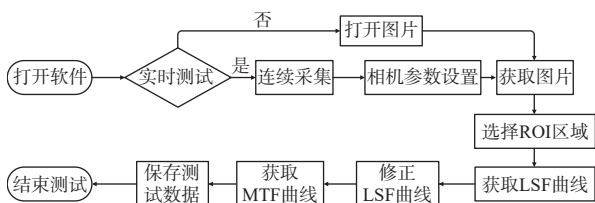


图 5 MTF 测试软件流程图

Fig. 5 Flow chart of MTF testing software

3 实验结果与分析

3.1 准备工作

此次进行调制传递函数测试的 EBAPS 器件探测器型号为 UV1280,该器件的像元尺寸为 $12.5\ \mu\text{m} \times 12.5\ \mu\text{m}$,数字图像输出的位深度为 8 位。由于目前缺乏 EBAPS 器件 MTF 的测试标准,因此依据像增强器通用规范,在测试过程中,输入光照度应当不大于 $2 \times 10^{-2}\ \text{lx}$,并将放置待测 EBAPS 器件以及驱动电路的黑盒子放置在成像物镜出光口的位置,给驱动电路外加 5 V 的电压使其正常工作,EBAPS 采集到的图像通过 USB 传输到上位机并进行实时显示。在实际测试过程中,狭缝靶标的像无法完全占满整个 APS 区域,因此在图像处理与计算之前会选取狭缝图像的一部分,即感兴趣区域(ROI)进行后续的 MTF 计算。

3.2 结果分析

由于目前课题组没有现成的测试系统可供对比,因此借助一款型号为 C11440-52U 的滨松相机来验证该系统对离散器件 MTF 测试的准确性。该

型号相机的像元尺寸为 $6.5\ \mu\text{m} \times 6.5\ \mu\text{m}$,结合成像物镜的放大倍数为 3 倍,在既能满足采样定理,又能消除缝宽影响的前提下,选用缝宽为 $40\ \mu\text{m}$ 的狭缝进行测试。基于上述搭建的测试系统,调节卤钨灯光源至合适照度,最终将测得的 MTF 数据与该相机官方手册上的 MTF 数据进行对比,并在 $2.5\ \text{lp/mm}$ 、 $7.5\ \text{lp/mm}$ 、 $15\ \text{lp/mm}$ 、 $25\ \text{lp/mm}$ 这 4 个重要频率点计算其误差率,实验数据对比如表 1 所示。

表 1 滨松相机 MTF 测试结果与官方数据对比

Table 1 Comparison of MTF test results of Hamamatsu camera with official data

数据类型	频率/($\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$)			
	2.5	7.5	15	25
测试数据	0.991	0.915	0.717	0.450
官方数据	0.988	0.903	0.693	0.453
误差率/%	0.30	1.33	3.46	0.66

由表 1 可以看出,在这 4 个频率点处所测得的 MTF 结果与官方数据的误差率基本上在 5% 以内,因此可以认为本套 EBAPS 的 MTF 测试系统测试结果是准确的。

为分析器件在不同轰击电压下 MTF 的变化,设置 EBAPS 器件的读出增益为 4^* ,曝光时间为 33 ms。由于在该照度下,轰击电压过低,输出图像中没有足够的狭缝亮度信息,过高的轰击存在击穿 EBAPS 的风险,因此在分析 EBAPS 器件在不同轰击电压下 MTF 的变化趋势时,给 EBAPS 从 $-600\ \text{V} \sim -1\ 200\ \text{V}$ 每隔 200 V 外加负高压,并获取此时的 MTF 结果。实验发现,在外加电压为 $-1\ 200\ \text{V}$ 时,狭缝中心大部分像素已经过曝。由于硬件程序上的设置,在灰度大于 255 时,会将其像素灰度设置为 0,此时无法准确测试其 MTF 曲线,因此补充测试了外加电压为 $-1\ 100\ \text{V}$ 时的 MTF。由于通常情况下将 MTF 在 0.03 处的频率定为极限分辨率,因此为了更加直观分辨出不同电压下器件极限分辨率的频率位置,将纵坐标的范围设置为 $0.03 \sim 1$,并将光成像以及不同电压下的 MTF 曲线绘制在同一个坐标系中如图 6 所示。

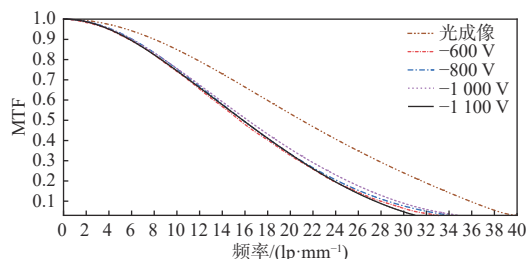


图 6 UV1280 在光成像以及不同电压下的 MTF 曲线对比

Fig. 6 Comparison of MTF curves of UV1280 under optical imaging and different voltages

从图6可看出,由于亮度信息上的优势,光成像下的MTF明显高于电成像,而在电成像不同电压下,外加电压从-600 V升高到-1 000 V时,MTF曲线随着电压升高呈现上升趋势;从-1 000 V升高到-1 100 V时,MTF下降幅度明显,且极限分辨率从34.5 lp/mm下降至31 lp/mm。同时从曲线的变化幅度可以看出,电压的变化对MTF曲线的影响主要集中在中高频阶段,低频部分的MTF随着电压变化的幅度较小。

为了更加直观地展现EBAPS的调制传递函数在不同频率位置受到电压变化的影响,同样是选取在评估成像性能时比较重要的4个频率点进行比较,得到的测试曲线如图7所示。从图中可以看出,随着EBAPS的轰击电压升高,器件的MTF呈现出先升高后降低的趋势,并且在轰击电压为-1 000 V时,该照度下的EBAPS能获得最高的MTF。另外,随着频率的升高,MTF随着电压变化的幅度逐渐增大。因此可以表明,UV1280的极限分辨率更容易受到外加轰击电压的影响。

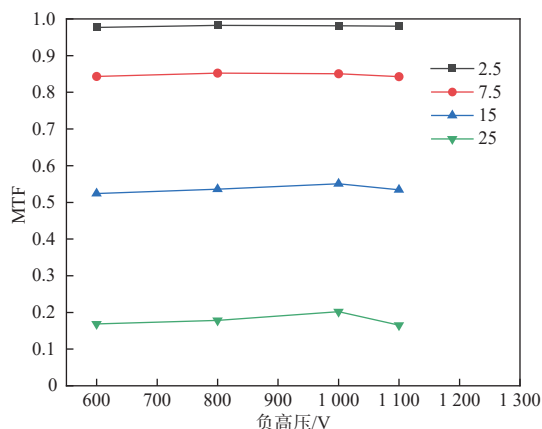


图7 不同高压下几个重要频率点的MTF值变化

Fig. 7 Changes in MTF values at several important frequency points under different high voltages

在相同的输入光功率、曝光时间、读出增益下,器件输出的图像灰度会随着轰击电压不同而发生改变。在特定照度下,找到最合适的轰击电压,使EBAPS处于正常工作的状态,此时的MTF便是最优的。在本次实验中, 2×10^{-2} lx照度下,在轰击电压为-1 000 V时,EBAPS器件处于正常工作的状态,MTF在此时也达到峰值。在低于-1 000 V的轰击电压下,轰击到CMOS上的电子数减少,导致输出的狭缝图像信息减弱,器件的MTF也随之而降低;在高于-1 000 V的轰击电压下,电压越大,越有利于电子聚焦,电荷的收集效率也越高,但同

时狭缝图像的亮度也随之增大,超过了器件正常工作的范围,导致测得的MTF也随之降低。因此,在一定范围内,随着轰击电压的升高,EBAPS器件的MTF值会出现先增大后减小的趋势,与实验结果相吻合。

为验证该测试系统的稳定性,将EBAPS的各项参数设置成与上述实验相同,并调节光源至合适照度,使器件工作在光成像模式下。由于EBAPS是离散器件采样测试,为了分析狭缝图像在传感器成像面任意像素位置测试结果的偏差,那么需要将成像器件在成像焦平面上沿着垂直狭缝方向进行微调,以此来测试狭缝在不同像素位置的MTF结果。配合硬件平台上三维调节装置的细准焦螺旋实现亚像素的位移,并重复实验5次,将所有曲线绘制在同一张坐标系中,得到的测试结果如图8所示。首先,从图8可以看出5次测试的MTF曲线基本重合在一起,那么说明狭缝图像在传感器成像面任意位置的测试结果偏差较小,表明该测试系统的稳定性较好。

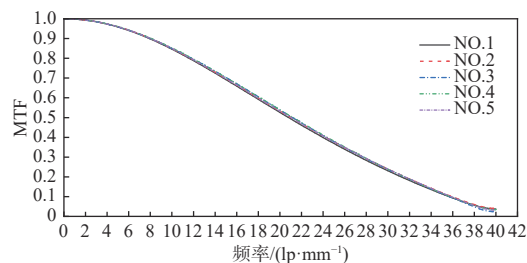


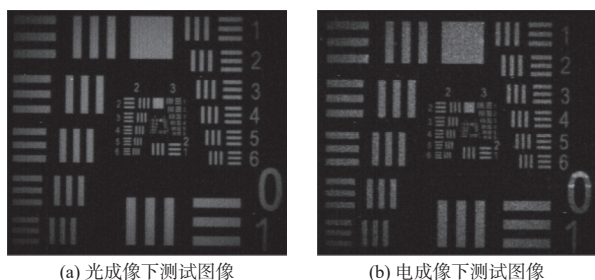
图8 光成像下5次亚像素位移分别获得的MTF曲线

Fig. 8 MTF curves obtained from five sub-pixel displacements under optical imaging

同时从图8可以看出,光成像下该器件的极限分辨率为39 lp/mm,而在电成像模式下,外加电压为-1 000 V时,器件成像最优时的极限分辨率为34.5 lp/mm,因此光成像下的成像性能明显优于电成像。为了进一步验证光成像和电成像之间的成像差别,在照度为2.5 lx时使EBAPS工作在光成像模式下,照度为 1×10^{-3} lx时对器件外加-1 000 V电压,使其工作在电成像模式下,分别对分辨率靶标进行成像,得到的图像如图9所示。

从图9可以看出,首先光成像下的条纹图像更加连续,而电成像是电子轰击的结果,白条纹是由许多亮点组成的,相比之下有较多的暗点区域。另外对于极限分辨率,光成像下能分辨出USAF 1951分辨率测试靶中3-4甚至3-5的条纹,而电成像下只能达到3-2的水平。该EBAPS器件电成像

下的极限分辨率性能与光成像相比会有一定程度上的减弱,这与 MTF 测试结果相吻合。



(a) 光成像下测试图像

(b) 电成像下测试图像

图 9 光成像和电成像下的分辨率图像

Fig. 9 Resolution images under optical imaging and electrical imaging

表 2 5 次测试中 4 种频率下 MTF 的标准差

Table 2 Standard deviation of MTF at 4 frequencies in 5 tests

频率/(lp·mm ⁻¹)	测试次数					平均值	标准差
	1	2	3	4	5		
2.5	0.989 41	0.989 70	0.989 42	0.989 86	0.989 72	0.989 622	0.000 198
7.5	0.909 58	0.911 81	0.911 29	0.913 31	0.911 84	0.911 566	0.001 341
15	0.692 23	0.697 76	0.703 22	0.702 93	0.697 01	0.698 630	0.004 579
25	0.369 02	0.377 74	0.378 04	0.381 18	0.377 30	0.376 656	0.004 535

从表 2 中可以看出,在这 5 次测试实验中,EBAPS 在这 4 个频率点下 MTF 的标准差均低于 0.01,重复性较好,可以表明该测试系统是稳定的,满足测试指标的要求。

4 结论

MTF 是评价光学系统成像质量的重要指标,针对目前缺乏 EBAPS 器件调制传递函数测试手段的问题,基于微光像增强器调制传递函数的测试方法,搭建了一套 EBAPS 调制传递函数的测试系统,并在软件中实现了 USB3.0 数据传输、图像采集与实时显示、LSF 获取、曲线滤波、MTF 获取等功能。通过测试滨松相机的 MTF 与官方手册的数据进行对比,验证了该测试系统的准确性,并且误差率基本在 5% 以内。在控制狭缝处照度为 2×10^{-2} lx 时,使 EBAPS 工作在电成像模式下,并在 -600 V ~ -1 400 V 范围内从低到高施加轰击电压,MTF 曲线整体上会先变好再变差,由此找到该照度下, -1 000 V 是该型号 EBAPS 器件成像最优的轰击电压值。此外,当 EBAPS 工作在光成像模式时,微调狭缝图像与传感器成像面的相对位置,分别计算此时的 MTF,连续 5 次测试的结果显示在 4 个重

为了进一步量化多次实验的重复度,计算 5 次测试过程中,频率在 2.5 lp/mm、7.5 lp/mm、15 lp/mm、25 lp/mm 这 4 个重要频率点的 MTF 值,并用多次测试数据的标准差 $S(x)$ 来作为测试重复性的评价标准^[21],计算公式如式(8)所示:

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8)$$

式中: n 表示测试次数; x_i 表示第 i 次测试的结果; $\bar{x}$ 表示多次测试结果的平均值。根据这几个重要频率点的多次测试结果计算其平均值和标准差,最终的结果如表 2 所示。

要频率点的测试值标准差均小于 0.01,验证了该测试系统的稳定性。该 MTF 测试系统以及上述实验结果,对后续提升 EBAPS 的成像质量提供了理论依据和实验支撑。

参考文献:

- [1] 张元涛,曹开钦,孙德新,等. 高灵敏度低噪声科学级 CMOS 图像传感器微光探测[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 146-154.
ZHANG Yuantao, CAO Kaiqin, SUN Dexin, et al. Low light level detection based on scientific CMOS image sensor with high sensitivity and low noise[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 146-154.
- [2] 李晓峰,何雁彬,常乐,等. 超二代与三代像增强器性能的比较研究[J]. 红外技术, 2022, 44(8): 764-777.
LI Xiaofeng, HE Yanbin, CHANG Le, et al. Performance comparison between super second generation and third generation image intensifiers[J]. Infrared Technology, 2022, 44(8): 764-777.
- [3] 陈旭浪,党小刚,郭欣达,等. 基于三代微光 ICCD 成像装置的目标对比度影响因素测试分析[J]. 应用光学, 2020, 41(6): 1241-1246.

- CHEN Xulang, DANG Xiaogang, GUO Xinda, et al. Test and analysis of factors influencing target contrast ratio based on 3rd generation LLL ICCD imaging device[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(6): 1241-1246.
- [4] 张静, 孙宇勃, 付秀华, 等. 微光系统 CMOS 光学调色膜的研制[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 264-270.
- ZHANG Jing, SUN Yubo, FU Xiuhua, et al. Development of CMOS optical color modulation films for low-light-level systems[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 264-270.
- [5] 刘虎林, 王兴, 田进寿, 等. 高分辨紫外电子轰击互补金属氧化物半导体器件的实验研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(1): 175-180.
- LIU Hulin, WANG Xing, TIAN Jinshou, et al. High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 175-180.
- [6] 严毅赞. EBAPS 器件综合测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- YAN Yiyun. Research on comprehensive testing technology for EBAPS devices[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [7] AEBI V W, COSTELLO K A, ARCUMI P W, et al. EBAPS: next generation, low power, digital night vision[C]//OPTRO 2005 International Symposium. Paris: [s.n.], 2005: 10.
- [8] 唐小东. EBAPS 电子轰击性能测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- TANG Xiaodong. Research on EBAPS electronic bombardment performance testing technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [9] 倪进园, 王璐子, 王颢, 等. 微光像增强器的 MTF 测试技术研究[J]. *红外技术*, 2019, 41(12): 1161-1166.
- NI Jinyuan, WANG Luzi, WANG Hao, et al. Research on measurement technology of the MTF of low-light level image intensifiers[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(12): 1161-1166.
- [10] 陶禹, 金伟其, 王瑶, 等. 高性能近贴式像增强器的调制传递函数分析[J]. *光子学报*, 2016, 45(6): 168-173.
- TAO Yu, JIN Weiqi, WANG Yao, et al. The MTF analysis of high performance proximity image intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(6): 168-173.
- [11] YANG C H, WANG S C, SHIH P T Y, et al. An experimental comparison of directly and indirectly derived modulation transfer functions[J]. *The Photogrammetric Record*, 2015, 30(149): 100-114.
- [12] 赵曼, 姜博, 范秀英, 等. CCD 相机调制传递函数的测试分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 98-102.
- ZHAO Man, JIANG Bo, FAN Xiuying, et al. Measurement and analysis on the modulation transfer function of CCD camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 98-102.
- [13] 郭晓兵. 基于图像处理的 MTF 测试系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- GUO Xiaobing. Research on MTF testing system based on image processing[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [14] RINO S, AKIHISA T, KENTARO U, et al. Method for estimating modulation transfer function from sample images[J]. *Micron: the international research and review journal for microscopy*, 2018, 105: 64-69.
- [15] 孙钦杰. 光学镜头调制传递函数测试与补偿算法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- SUN Qinjie. Research on testing and compensation algorithm for optical lens modulation transfer function[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [16] 刘小冬, 张新, 王灵杰, 等. 红外系统 MTF 狭缝测量法的改进[J]. *红外技术*, 2009, 31(9): 521-524.
- LIU Xiaodong, ZHANG Xin, WANG Lingjie, et al. Improvement of MTF slit measurement method in infrared system[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(9): 521-524.
- [17] 卞江, 马冬梅, 孙鸽, 等. 红外光电成像系统 MTF 测试技术分析[J]. *应用光学*, 2013, 34(5): 748-753.
- BIAN Jiang, MA Dongmei, SUN Ge, et al. MTF test technology analysis of infrared electro-optical imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(5): 748-753.
- [18] 朱宏权, 王奎禄, 向世明, 等. 微通道板像增强器的调制传递函数的测量与研究[J]. *光子学报*, 2007(11): 1983-1987.
- ZHU Hongquan, WANG Kuilu, XIANG Shiming, et al. MTF measurement and analysis of micro-channel plate image intensifiers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007(11): 1983-1987.
- [19] 李升才, 金伟其, 许正光, 等. 微光增强型电荷耦合装置成像系统调制传递函数测量方法研究[J]. *兵工学报*, 2005(3): 343-347.
- LI Shengcai, JIN Weiqi, XU Zhengguang, et al. Research on measurement method of modulation transfer function for imaging system of low light intensity enhanced charge coupled device[J]. *Acta Armamentarii*, 2005(3): 343-347.
- [20] 严毅赞, 钱芸生, 张景智, 等. 电子轰击有源像素传感器

光谱响应测试系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 123-128.

YAN Yiyun, QIAN Yunsheng, ZHANG Jingzhi, et al. Design of spectral response test system for electron bombardment active pixel sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 123-128.

[21] 苏天宁, 刘峰阁, 王强, 等. 紫外像增强器的调制传递函数测试系统设计[J]. 红外技术, 2022, 44(5): 469-474.

SU Tianning, LIU Fengge, WANG Qiang, et al. Design of modulation transfer function test system for ultraviolet image intensifiers[J]. Infrared Technology, 2022, 44(5): 469-474.