

引用格式: WANG Hongchao, WANG Jiqiang, WU Bin, et al. Modulation Transfer Function Testing Technology of Ultraviolet Focal Plane Arrays Device[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1204002

王洪超,王继强,吴斌,等. 紫外焦平面阵列器件调制传递函数测试技术[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1204002

紫外焦平面阵列器件调制传递函数测试技术

王洪超¹, 王继强², 吴斌^{1,3}, 李京松¹, 刘红元¹, 赵发财¹, 应承平¹

(1 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

(2 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

(3 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘 要: 针对紫外焦平面阵列器件调制传递函数的测试需求, 基于刀口扫描法, 搭建了一套调制传递函数测试系统。采用 SW-Cassegrain 同心反射系统方案实现刀口在探测器表面清晰成像, 经测试, 在 0~100 lp/mm 范围内可以达到衍射极限。利用该系统对紫外焦平面阵列器件进行了实际测试, 测试过程中采用调制传递函数曲线下面积值最大的原则实现刀口像的自动调焦, 采用三项费米函数的拟合模型对边缘扩散函数数据进行拟合, 提高了拟合精度。实验结果表明在器件奈奎斯特频率处的调制传递函数值为 0.601, 接近器件的理论极限值, 同时在奈奎斯特频率范围内, 调制传递函数测量值的相对标准偏差最大为 1.8%, 获得了很好的测量重复性。不确定度分析结果表明, 该装置对紫外焦平面阵列器件调制传递函数测试的测量不确定度为 6.2%, 能够很好地满足实际应用需求。

关键词: 探测器; 调制传递函数; 刀口扫描法; 紫外焦平面; 刀口成像光学系统

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215012.1204002

Modulation Transfer Function Testing Technology of Ultraviolet Focal Plane Arrays Device

WANG Hongchao¹, WANG Jiqiang², WU Bin^{1,3}, LI Jingsong¹, LIU Hongyuan¹, ZHAO Facai¹,
YING Chengping¹

(1 The 41st Institute of CETC, Qingdao, Shandong 266555, China)

(2 Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(3 Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract: Aiming at the test requirements of modulation transfer function for ultraviolet focal plane arrays, a system based on knife-edge scanning method is built to measure the modulation transfer function. Knife-edge is clearly imaged on the detector by a SW-Cassegrain reflective optical system and actual test shows that the optical system is near the diffraction-limitation in range of 0~100 lp/mm. An ultraviolet focal plane array device is tested by this system and the principle of maximum area under modulation transfer function curve is adopted to realize automatic focusing of knife edge image. The edge spread function curve is fitted by the model of three term Fermi function, which can effectively increase the fitting accuracy. Experimental results show that the measured modulation transfer function value of ultraviolet focal plane arrays is about 0.601, which is close to its theoretical limit. Meanwhile, the repeatability is good, and relative standard deviation of modulation transfer function within the Nyquist frequency range is about

基金项目: 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室开放课题(No. IIMDKFJJ-19-05), 国防技术基础(No. JSJL2019210C011)

第一作者: 王洪超(1988—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光电探测器计量测试技术。Email: whc5619313@163.com

通讯作者: 王继强(1982—), 男, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为红外和紫外光电探测器评价及成像技术。Email: wangjiqiang@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2021-07-07; 录用日期: 2021-08-11

<http://www.photon.ac.cn>

1.8%. Uncertainty analysis indicate that maximum uncertainty of the equipment is about 6.2%, which can meet the needs of practical application.

Key words: Detectors; Modulation transfer function; Knife-edge scanning; Ultraviolet focal plane arrays; Knife-edge imaging optical system

OCIS Codes: 040.1240; 040.5160; 040.7190

0 引言

紫外焦平面阵列(Ultraviolet Focal Plane Arrays, UV FPA)是新一代紫外探测器,它集成了材料、探测器阵列、微电子、互联、封装等多项尖端技术,是现代紫外成像系统中的关键器件^[1-2]。作为成像器件,紫外焦平面最重要的性能指标是对成像物体细节的辨别能力。调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)是紫外焦平面阵列的主要性能参数之一,它是空间频率的响应来评价输出输入信号的调制度之比,可以用于定量评价紫外焦平面阵列的成像质量。通过测试紫外焦平面器件的MTF,可以了解并评估器件的成像特性和性能。

焦平面阵列器件是离散的采样成像器件,它对输入信号的采样是线性但不是完全空间不变的^[3]。为此, WITTENSTEIN W等在考虑采样位相的情况下,对处于线性工作范围离散成像系统的等晕定义进行了扩展^[4]。这种扩展的局域等晕定义扫清了将MTF用于阵列器件成像质量评价的理论障碍,所以在奈奎斯特(Nyquist)频率以内,调制传递函数理论是适用的。对于阵列型探测器MTF的测试,大多是在普通光学元件MTF测试方法的基础上发展起来的,主要方法包括直接测量法和间接测量法^[5]。近年来不断有新的调制传递函数测试方法和测试设备的报道,其中大部分是CCD器件及成像系统^[6-10],也有一些是红外焦平面器件^[11-14]。对于紫外焦平面阵列,受限于焦平面器件的发展水平,目前国内外很少有单位对其调制传递函数的测试方法及测试技术进行研究。

MTF是紫外焦平面器件的主要性能参数之一。本文基于刀口扫描法,设计了SW-Cassegrain反射式刀口成像光学系统,并搭建了相关测试系统,对一款阵列规模 320×256 ,像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$ 的紫外焦平面阵列器件进行了测试,并对测量不确定度进行了评估,获得了理想的测量结果。

1 测量原理

对于无限小单位强度亮点物,即物体是光强度单位脉冲函数时,在像面上形成的光强度分布便是非相干成像系统的脉冲响应函数,称为点扩散函数(Point Spread Function, PSF)。对于空间扩展物,像面光强度分布是物面光强度分布和点扩散函数的卷积^[15]

$$i(x', y') = o(x, y) * \text{PSF}(x, y) \quad (1)$$

式中, $i(x', y')$ 和 $o(x, y)$ 分别表示像和物的光强分布, (x', y') 和 (x, y) 分别是像面和物面坐标。对式(1)作傅里叶变换,并根据卷积定理,可得

$$I(u, v) = O(u, v) \cdot \text{OTF}(u, v) \quad (2)$$

式中, $I(u, v)$ 和 $O(u, v)$ 分别是 $i(x', y')$ 和 $o(x, y)$ 的傅里叶变换,OTF(u, v)是PSF(x, y)的傅里叶变换, u, v 是频域中沿两个坐标轴方向的空间频率。式(2)表示像的强度谱等于物的强度谱乘以光学传递函数(Optical Transfer Function, OTF),定义为PSF的傅里叶变换,调制传递函数是光学传递函数的模,即

$$\text{MTF}(u, v) = |\text{OTF}(u, v)| \quad (3)$$

如果物是一条亮线,则得到的像分布函数称为线扩散函数(Line Spread Function, LSF),与点扩散函数的关系为

$$\text{LSF}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{PSF}(x, y) dy \quad (4)$$

此时根据傅里叶变换的卷积原理可得一维调制传递函数为线扩散函数的傅里叶变换。此外,与线扩散函数有关的另一响应是刀口函数,即边缘扩散函数(Edge Spread Function, ESF),是系统对直边物体的响应。直边光源可认为是线光源的积分,根据线性叠加原理,ESF可表示为

$$\text{ESF}(x) = \int_{-\infty}^x \text{LSF}(x) dx \quad (5)$$

反之,从ESF可求得LSF

$$\text{LSF}(x) = \frac{d\text{ESF}(x)}{dx} \quad (6)$$

因此,在得到ESF曲线后,对其求导便可以得到对应的LSF曲线,再通过傅里叶变换可得被测系统的MTF曲线,具体数据计算过程见图1。

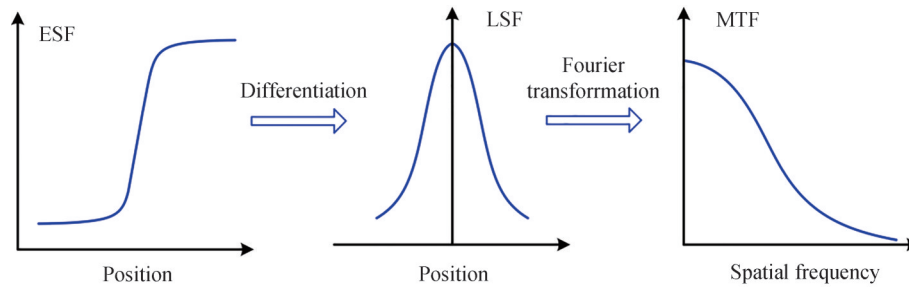


图1 刀口扫描法测量MTF计算过程

Fig. 1 Calculation procedure of MTF obtained from knife edge scanning method

2 测试系统设计

2.1 系统总体方案

紫外焦平面阵列调制传递函数测试系统布局如图2所示。该系统主要由紫外光源、刀口目标、刀口成像光学系统、焦平面阵列数据采集系统、精密三维位移台、焦平面阵列驱动及数据采集系统以及控制计算机组成。紫外光源发出的紫外辐射照射刀口目标,再经过刀口成像光学系统成像到被测紫外焦平面阵列光敏面上。被测紫外焦平面阵列置于三维位移台上并随位移台移动,经过自动调焦过程确保刀口在紫外焦平面阵列光敏面上清晰成像,测试时控制位移台沿垂直于刀口的方向上作步进扫描,由数据采集系统采集被测紫外焦平面阵列的输出信号,得到刀口扫描曲线。对刀口扫描曲线进行曲线拟合,经微分运算得到线扩展函数,最后经过离散傅立叶变换和光学系统自身MTF扣除后得到被测紫外焦平面阵列器件的调制传递函数。

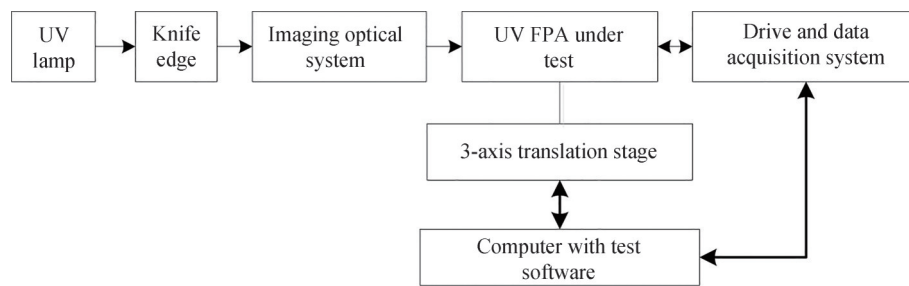


图2 紫外焦平面调制传递函数测试系统原理

Fig. 2 Schematic of MTF measurement of ultraviolet focal plane arrays

系统中三维位移机构重复定位精度可以达到 $\pm 0.25 \mu\text{m}$,载物台最大负载5 kg,可以很好地满足带动被测紫外焦平面阵列器件实现刀口扫描的需要。位移台每个运动方向上均采用步进电机驱动、精密滚珠丝杆传动、精密直线导轨导向、开式光栅闭环控制相结合的形式,以保证位移台在X、Y、Z三个方向运动的精度和直线性。精密三维位移台基座采用双零级花岗岩平台,以提供高的稳定性和表面精度。紫外光源采用氙灯光源。利用美国PI公司的PI3105数据采集系统实现紫外焦平面探测器的数据采集。

2.2 刀口成像光学系统

该系统的核心部分为刀口成像光学系统,该系统用于产生200~400 nm紫外波段的优质刀口像。传统

方案多采用平行光管+光学镜头成像来实现阵列器件的MTF测试,但该方案涉及到的光学系统比较多,调试难度较大,同时后续光学系统MTF的扣除也带来了更大的测量误差;Offner三反系统的优点是点对点成像,球差和慧差较小,并且光路的传播过程中不存在遮拦,但是测试时主光线需要偏离光轴一定距离,而轴外存在严重的像散,不宜用于器件MTF的测试,同时Offner三反系统主镜的口径较大,给镜头的加工和装调也带来了一定的难度。

综合考虑系统工作波段、光学材料以及光学系统加工装调难度后,采用SW-Cassegrain同心反射系统方案,光路如图3所示,其中凸反射镜的通光口径为 $\Phi 40$ mm,凹反射镜的通光口径为 $\Phi 200$ mm,系统像面位置和凹反射镜的距离为567.69 mm,像空间的工作 F 数约为2.84。

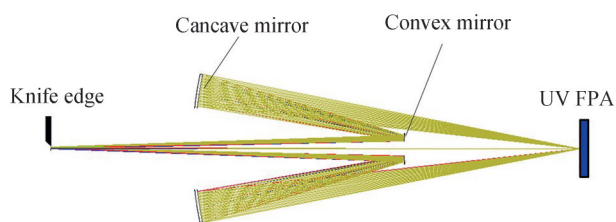


图3 SW-Cassegrain 反射式光学系统光路
Fig. 3 Optical path of SW-Cassegrain reflective optical system

刀口狭缝组件安置在系统的物平面上,狭缝高度为2 mm、3 mm和4 mm,手动可调,调节板安装在一导轨上,狭缝的宽度0~5 mm连续可调。不同视场的点列图如图4所示。根据点列图可知,紫外刀口成像光学系统物面对物面 $1.6\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 区域内(对应可调节狭缝最大缝宽和缝高)都能理想成像。同时采用ZYGO动态干涉仪对系统的波前面形误差进行检测,实测结果为 $\text{RMS}=0.025\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),达到了设计指标要求。

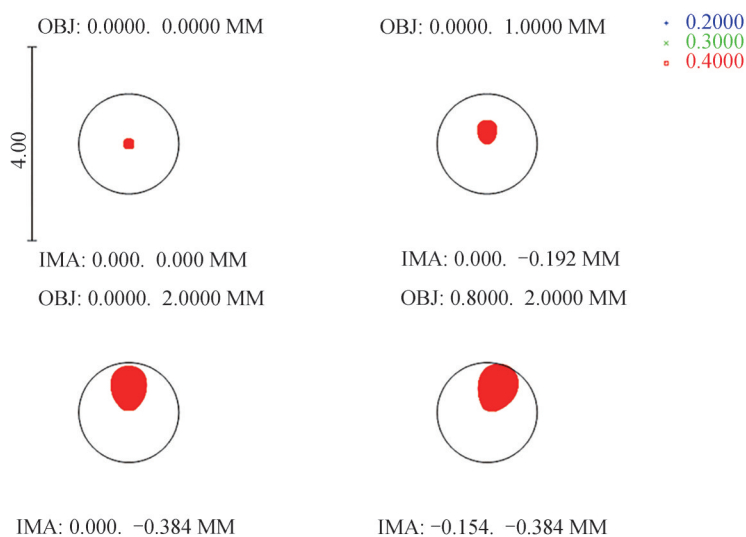


图4 SW-Cassegrain反射系统不同视场的点列图
Fig. 4 Spot diagram of SW-Cassegrain reflective optical system at different field of view

利用optikos传递函数测试仪对刀口成像光学系统的MTF进行标定,由于本文中紫外焦平面阵列器件的光谱响应范围为255~280 nm,MTF的测试也在其响应波段内进行,而传函仪无法对该波长点下的MTF进行标定,因此首先利用传函仪对546 nm处的MTF进行定标,成像系统子午方向和弧矢方向上的实际定标结果和理论数据见图5,传函仪的测试不确定度为0.03,对比测试数据和系统的衍射极限理论数据,可以判定系统达到衍射极限。综合以上分析,可利用刀口成像光学系统的MTF设计理论值来进行后续测试数据的扣除,该系统在270 nm和365 nm波长下的设计理论值见图6。在0~100 lp/mm范围内均可以达到0.7以上,能够满足紫外焦平面阵列器件MTF的测试需要。

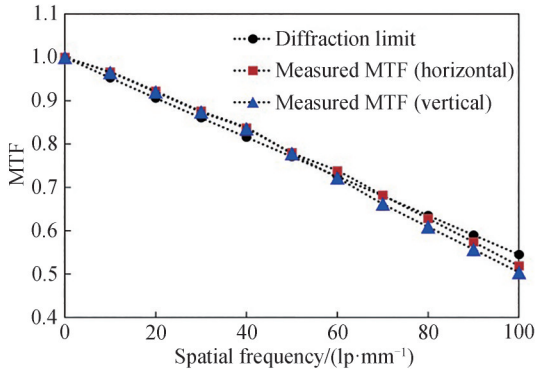


图5 刀口成像光学系统MTF数据测量值和理论值对比
Fig. 5 Comparison between measured and theoretical MTF data of knife-edge imaging optical system

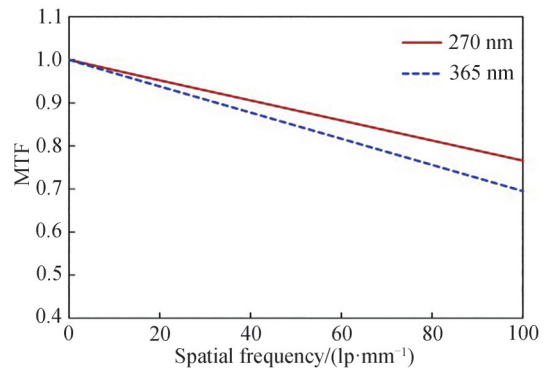


图6 刀口成像光学系统不同波长点下的MTF理论设计值
Fig. 6 Theoretical design MTF value of knife-edge imaging optical system at different wavelengths

3 实验及数据处理

实验所用紫外焦平面阵列器件为中科院上海技术物理研究所研制的全固态日盲紫外 320×256 面阵AlGaIn成像探测器,如图7。该器件光谱响应范围为 $260 \sim 285 \text{ nm}$,工作在日盲区,光敏元中心间距为 $30 \mu\text{m}$,对应的奈奎斯特频率为 16.67 lp/mm 。测试时将探测器安置在精密三维位移台上,紫外刀口通过成像光学系统在被测探测器像面上清晰成像。选取刀口像附近的一块感兴趣矩形区域进行数据分析,三维位移机构的扫描步长为 $1 \mu\text{m}$,共扫描256步,扫描距离约为 $8 \sim 9$ 个像元的距离,每扫描一个步长,采集感兴趣区域内所有像元的输出信号,选取其中1个像素的刀口扫描数据进行计算。

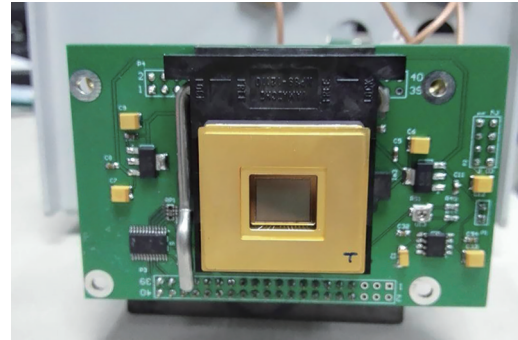


图7 被测紫外焦平面阵列探测器
Fig. 7 UV FPA under test

3.1 刀口像自动调焦

紫外焦平面阵列调制传递函数测量时,要求刀口像准确地聚焦在被测紫外焦平面阵列的光敏面上,如果刀口像对焦不准,无法在红外探测器光敏面上理想成像的话,将无法得到较好的采样数据,测得的MTF曲线偏差会很显著。

实验中采用动态定焦技术来实现刀口像的自动聚焦^[16],具体实现过程为:首先将刀口像大致调整到清晰成像的位置,在该焦面附近选取多个聚焦位置进行刀口扫描,得到不同聚焦状态下的多条MTF曲线,然后计算出这些MTF曲线下的面积值(即曲线积分值),最后采用洛伦兹曲线拟合模型对这些面积值进行拟合,得到MTF面积最大值对应的位置,该位置即为准确焦面位置。图8为在9个焦面位置处测得的MTF曲线面积值,其中每个焦面之间的间隔为 $20 \mu\text{m}$,中心焦面定义为位置零点,根据拟合结果可得在 $x = -1.4 \mu\text{m}$ 位置处,MTF曲线下面积值达到最大,然后将三维位移机构移动到该位置进行MTF最终测试。

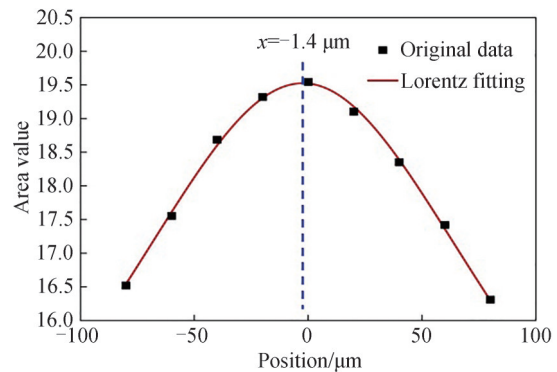


图8 不同焦面位置MTF曲线面积值的洛伦兹拟合
Fig. 8 Lorentzian fit of area value under MTF curve at different positions

3.2 ESF曲线平滑拟合

获取到刀口的ESF曲线时需要对其进行平滑和拟合,以避免直接对ESF曲线表达式求导而增加噪声。

实验中首先对ESF曲线进行了五点三次多项式的平滑处理,可以较好地滤除噪声较大的数据点的影响,然后对平滑后的ESF曲线进行拟合,费米函数和ESF曲线的形状高度相似,同时考虑到实际的ESF曲线一般是非对称的,因此选用三项费米函数的拟合模型,其拟合公式为

$$ESF(x) = d_1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{\exp[(x - b_i)/c_i] + 1} \quad (7)$$

式中, d_1 、 a_i 、 b_i 和 c_i 为三项费米函数模型的拟合系数,一共有10个,其中 i 的取值范围为 $1 \leq i \leq 3$ 。拟合后的ESF曲线以及微分运算并归一化后的LSF曲线见图9,与传统的多项式拟合相比,费米函数拟合可更好地模拟刀口扫描函数,而且可以充分利用亮边和暗边处的数据,避免了多项式拟合在平坦的亮边和暗边处拟合数据产生振荡的不足,大大提高了拟合精度。且由此计算出的LSF曲线光滑并且对称,为后续MTF计算提供了准确的数值。

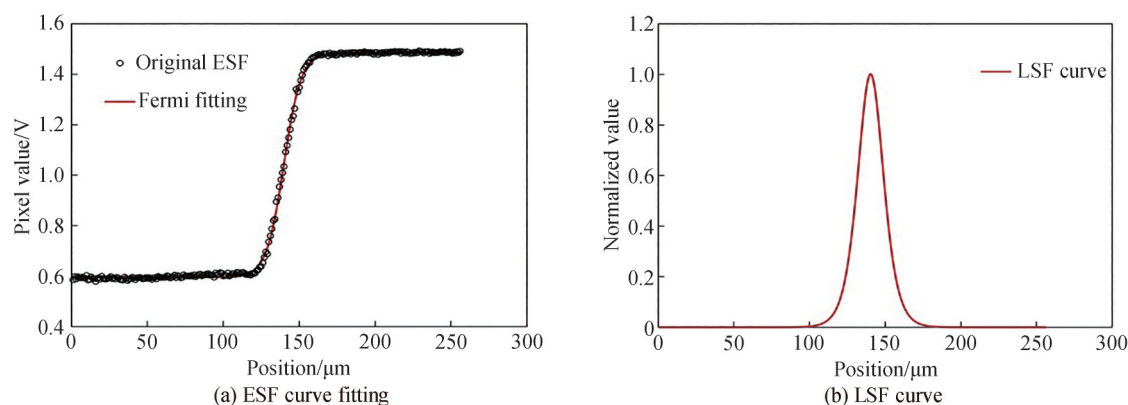


图9 ESF曲线数据处理
Fig. 9 Data processing of ESF curve

3.3 MTF计算

得到LSF曲线后,进行离散傅里叶变换即可得到MTF测量值。需要说明的是,此时得到的MTF值包含了成像光学系统和紫外焦平面阵列两者的总和,还需要对刀口成像光学系统相应的MTF值进行扣除,即可得到被测紫外焦平面阵列器件的MTF测量结果。在同样的实验条件下对探测器某一光敏元进行了6次重复测试,测试结果见图10。

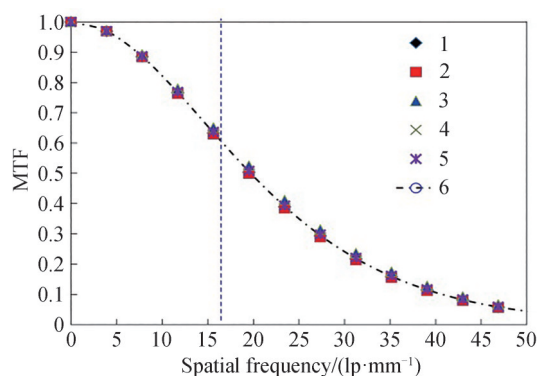


图10 MTF重复性测量结果
Fig. 10 Repeated MTF measurement results

由结果可以看出被测焦平面阵列在标称奈奎斯特频率16.67 lp/mm处的MTF平均值可以达到0.601,略小于阵列器件在奈奎斯特频率处的理论极限值0.637,这主要是由于探测器光敏元之间的串音、探测器的几何结构、光敏元光子转换为电荷的转换效率以及探测器信号采集及数据传输电路等因素的综合影响所致^[17]。在标称奈奎斯特频率内,6次MTF测量结果的相对标准偏差随空间频率的增加逐渐变大,最大值为

1.8%,由此可知该测试系统具有很好的测量重复性。

4 测量不确定度分析

4.1 测量不确定度来源

根据MTF计算公式,考虑系统各个组成部分,以及测试过程中人员、环境等各个因素对测试结果的影响,不确定度来源主要有以下几个方面构成^[18]:

1)测量重复性引入的测量不确定度 u_1

在标称奈奎斯特频率内,6次MTF测量结果的相对标准偏差最大为1.8%,其不确定度由6次测量平均值的相对实验标准偏差来表示,因此测量重复性引入的测量不确定度分量为 $u_1 = \frac{s_{(\text{MTF})}}{\sqrt{6}} \approx 0.74\%$ 。

2)紫外辐射不稳定性引入的测量不确定度分量 u_2

系统采用氙灯作为紫外辐射源,利用贝塞尔公式计算出该光源0.5 h内的辐射功率实验标准偏差,得其功率稳定性最大为0.4%,因此紫外辐射不稳定性引入的不确定度分量为 $u_2 = 0.4\%$ 。

3)紫外辐射非均匀性引入的测量不确定度分量 u_3

紫外辐射非均匀性会造成经过刀口成像光学系统后的光辐射不均匀,从而导致不同像元及不同扫描位置之间测试结果的差异。考虑到实际测试时所选取的刀口成像区域一般为几十个像素,一般小于 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,在此范围内紫外光功率非均匀性优于1%,则紫外辐射非均匀性引入的测量不确定度分量为 $u_3 = 1\%$ 。

4)紫外焦平面阵列响应不一致性引入的测量不确定度分量 u_4

该分量主要为紫外焦平面阵列响应率不均匀性及噪声的影响。不同像元之间响应率不均匀性的影响体现到ESF曲线上会导致ESF数据斜率不同,从而导致LSF曲线最大值的差异,但是在进行MTF计算之前需要对LSF曲线进行归一化,探测器响应率不均匀性对归一化后的LSF曲线线型基本无影响,因此响应率不均匀性对测量不确定度的影响可以忽略不计。紫外焦平面噪声会影响所有ESF数据点的值,而且是随机无规律的,因此不可忽略。经测试,被测器件噪声值约为1.4 mV,ESF曲线整个响应信号范围为1.047 V,因此噪声引起的紫外焦平面响应信号的变化为0.13%。保守估计,紫外焦平面阵列响应不一致性引入的测量不确定度分量为 $u_4 = 0.2\%$ 。

5)刀口调焦引入的测量不确定度分量 u_5

本文采用定焦计算技术,即在焦面附近测得多个不同聚焦条件下的MTF值,利用准确焦面位置处测得的MTF曲线所包含的面积为最大的原理,拟合出良好聚焦条件下的MTF值。根据实验结果,刀口调焦引入的不确定度分量约为 $u_5 = 1.8\%$ 。

6)位移台定位引入的测量不确定度分量 u_6

系统中位移台定位精度为 $\pm 0.25 \mu\text{m}$,按照紫外焦平面阵列像元光敏面宽度为 $30 \mu\text{m}$ 计算,位移台定位误差引起的刀口扫描曲线最大偏差为: $\pm (0.25/30)$,即 $\pm 0.8\%$ 。假设概率分布为均匀分布,包含因子 k 为 $\sqrt{3}$,位移台定位引入的不确定度分量为 $u_6 = \frac{0.8\%}{\sqrt{3}} = 0.46\%$ 。

7)刀口像与焦平面阵列方向不一致引入的测量不确定度分量 u_7

测量MTF时需要将被测紫外焦平面阵列的阵列方向与刀口像的直边方向一致。经过仔细调整,阵列方向与刀口的最大偏角控制在 $\pm 1^\circ$ 范围。该偏角引起的紫外焦平面响应信号的变化约为 $\pm \tan\left(\frac{1 \times \pi}{180}\right) = 1.75\%$,假设概率分布为均匀分布,包含因子 k 为 $\sqrt{3}$,刀口像与焦平面阵列方向不一致引入的不确定度分量为 $u_7 = \frac{1.75\%}{\sqrt{3}} \approx 1\%$ 。

8)数据采集系统引入的测量不确定度分量 u_8

数据采集系统的影响引入测量信号的最大误差极限约为 $\pm 0.1\%$,假设概率分布为均匀分布,包含因子 k

为 $\sqrt{3}$,数据采集系统引入的测量不确定度分量为 $u_8 = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.06\%$ 。

9)光学系统MTF扣除引入的测量不确定度分量 u_9

在数据处理时从测得的MTF中扣除了刀口成像光学系统自身的MTF。刀口成像光学系统经测试基本达到了衍射极限,所以其几何像差对系统MTF的影响可以忽略。此外,传递函数测试仪的MTF测量精度为 $\pm 3\%$ 。假设概率分布为均匀分布,包含因子 k 为 $\sqrt{3}$,光学系统MTF扣除引入的测量不确定度分量为 $u_9 = \frac{3\%}{\sqrt{3}} = 1.73\%$ 。

10)数据处理引入的测量不确定度分量 u_{10}

不确定度分量主要为采用三项费米函数模型进行拟合引入,实际采集数据点数为256,根据拟合结果,拟合曲线与刀口扫描曲线吻合得较好,三项费米函数拟合后的剩余标准偏差约为0.008 V,按照数据采集系统满量程 ± 2 V采集计算,剩余标准偏差相对值为 $0.008/4 = 0.2\%$ 。数据处理引入的不确定度分量为 $u_{10} = 0.2\%$ 。

4.2 合成标准不确定度和扩展不确定度

各分量之间独立不相关,所以合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} u_i^2} \approx 3.1\%$$

扩展不确定度为合成不确定度与包含因子的乘积,置信水平为95%时,取包含因子 $k=2$,那么扩展不确定度为

$$U = ku_c = 2 \times 3.1\% = 6.2\%$$

5 结论

本文采用刀口扫描法实现了紫外焦平面阵列MTF的测量。对焦平面阵列器件MTF的测量原理和测试方法进行了分析,设计了SW-Cassegrain结构的反射式成像光学系统,实现了刀口目标的理想成像,并基于此搭建了紫外焦平面阵列器件MTF测试系统。利用研制的测试系统对紫外焦平面阵列器件进行了实际测试,测试过程中采用了MTF曲线下面积值最大的原则实现刀口像的自动调焦,采用五点三次多项式的平滑方法和三项费米函数的拟合模型对ESF数据进行平滑拟合处理,获得了较为理想的ESF曲线,提高了拟合精度。测量结果表明被测器件在奈奎斯特频率处的MTF测量值接近于理论极限值,MTF测量值的相对标准偏差最大为1.8%,重复性较好。不确定度分析结果表明,该装置对紫外焦平面阵列器件调制传递函数测试的测量不确定度为6.2%,可以满足当前的实际应用需求。本文成功实现了紫外焦平面阵列器件的MTF测试,对于评价紫外成像器件的成像质量、成像理论的研究及紫外焦平面阵列的应用,都有很好的促进作用。

参考文献

- [1] QUAN Li, WANG Ying, LONG Weigang, et al. Advances in UV image sensor technology [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(4): 537-541.
权利,王颖,龙维刚,等.紫外图像传感器技术研究进展[J].半导体光电,2013,34(4):537-541.
- [2] WANG Jiqiang, XU Jintong, WANG Ling, et al. Design and implementation of ultraviolet imaging system based on solar-blind AlGaIn focal plane arrays[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(6): 45-49.
王继强,许金通,王玲,等. AlGaIn基日盲紫外探测器成像系统设计与实现[J].光学与光电技术,2018,16(6):45-49.
- [3] WANG Chunhong, XIANG Yang. MTF of line array CCD on detection performance for hyperspectral imager [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6): 1478-1481.
王春红,向阳.基于超光谱成像探测系统的线阵CCD的调制传递函数特性研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(6):1478-1481.
- [4] WITTENSTEIN W, FONTANELLA J C, NEWBERY A R, et al. The definition of the OTF and the measurement of aliasing for sampled imaging system[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1982, 29(1): 41-50.
- [5] ZHANG Zhiheng. Study for modulation transfer function of infrared focal plane array [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
张志恒.红外焦平面阵列测试系统和技术研究[D].南京:南京理工大学,2004.

- [6] ZHANG Xiaolin, DU Guohao, DENG Biao, et al. High precision measurement of modulation transfer function for X-ray CCD with knife-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1680~1687.
张晓琳, 杜国浩, 邓彪, 等. 刀口法高精度测量X射线CCD调制传递函数研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1680-1687.
- [7] GUAN Mingzhen. Study on MTF measurement of CCD camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
官明朕. CCD相机调制传递函数测量方法的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [8] HE XU, JI QI. Study on modulation transfer function measurement instrument with matrix for matrix CCD[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(10):1100-1108.
何煦, 姬琪. 面阵CCD调制传递函数测试仪器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10):1100-1108.
- [9] LI Hang, YAN Changxiang, SHAO Jianbing, et al. High accuracy measurement of the MTF of electro-optical imaging system based on modified slanted-edge method[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12): 1211002.
李航, 颜昌翔, 邵建兵, 等. 基于改进倾斜刃边法的光电成像系统高准确度测试[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 1211002.
- [10] LI Tiecheng, TAO Xiaoping, FENG Huajun, et al. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2891-2897.
李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2891-2897.
- [11] ZHANG Tong. Study on modulation transfer function characterization methods of HgCdTe infrared focal plane [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2018.
张瞳. 碲镉汞红外焦平面调制传递函数表征方法研究[D]. 上海:中科院上海技术物理研究所, 2018.
- [12] XU Zhonghua, FANG Jiaxiong. Modulation transfer function measurement of near infrared linear focal plane arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1204001.
许中华, 方家熊. 近红外线列探测器传递函数测试系统[J]. 光学学报, 2012, 32(12):1204001.
- [13] NGHIEMA J, JAECKA J, DERELLE S, et al. Study of the MTF of a MWIR T2SL focal plane array in IDDCA configuration[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 96: 192-198.
- [14] YING Chengping¹, WU Bin, WANG Hengfei, et al. MTF measurement of IRFPA based on double-knife edge scanning method[C]. SPIE, 2013, 8907: 890746
- [15] XIANG Chunchang. MTF Measurement of CCD Digital Camera[D]. Suzhou: Soochow University, 2011.
相春昌. CCD相机调制传递函数的测量[D]. 苏州:苏州大学, 2011.
- [16] WU Bin, LI Ligong, LIU Shangqian, et al. Accurate focusing of knife-edge imaging optical system based on the area under MTF curve[C]. SPIE, 2013, 8908: 89081U.
- [17] TONG Moying, CHANG Benkang, QIAN Yunsheng. Study for modulation transfer function of infrared focal plane array[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 22(5): 365-367.
童默颖, 常本康, 钱芸生, 等. 红外焦平面阵列调制传递函数研究[J]. 光学学报, 2003, 22(5): 365-367.
- [18] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, JJF1059.1-2012. Evaluation and expression of uncertainty in measurement[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2013.
国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1-2012. 测量不确定度评定与表示[S]. 北京:中国质检出版社, 2013.