

近红外线列探测器传递函数测试系统

许中华^{1,2} 方家熊¹

(¹ 中国科学院上海技术物理研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200083)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 器件的调制传递函数(MTF)表征了光电成像器件对空间频率的对比度传递特性,可以全面地评价其成像性能。随着器件的发展,用 MTF 来评价器件越来越受到重视。针对近红外 InGaAs 焦平面器件 MTF 的测试需求,搭建了一套用狭缝法测试该波段线列器件 MTF 的系统。系统采用全反射式 Offner 光学结构将狭缝高质量地成像在待测器件上。成像光学结构由两块共轴的球面反射镜构成,1:1 成像, F 数为 4;在芯片工作波长为 $1.7\ \mu\text{m}$ 时,在高达 $8\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}$ 的宽视场内,20 lp/mm(对应尺寸 $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$ 的芯片特征频率)处的实测 MTF 高于 0.8,接近衍射极限。利用该系统对 8×1 InGaAs 线列探测器进行 MTF 测试(标称光敏元尺寸为 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$),6 次重复测试得到的 MTF 数据的标准偏差与均值之比,在截止频率 10 lp/mm 内小于 2%,测量的相对不确定度小于 4.7%。

关键词 探测器;器件调制传递函数;近红外;InGaAs;狭缝法

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1204001

Modulation Transfer Function Measurement of Near Infrared Linear Focal Plane Arrays

Xu Zhonghua^{1,2} Fang Jiexiong¹

(¹ State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The modulation transfer function (MTF) of an electro-optical device describes the image quality in terms of contrast as a function of spatial frequency, which is a much better way to evaluate a device. With the development of electro-optical devices, MTF becomes a popular technique in device evaluation. A system to measure the MTF of near infrared InGaAs linear focal plane arrays is built and an all-reflective Offner relay is used to image the slit onto the measured device. The Offner relay consists of two coaxial spherical mirrors, operating as a 1:1 imager. At the working wavelength of $1.7\ \mu\text{m}$, the Offner relay shows a nearly diffraction limited performance over an $8\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}$ field, and the measured MTF at 20 lp/mm is above 0.8 everywhere in the field. Using this system, the MTF of an 8×1 InGaAs linear focal plane array (FPA), of which the nominal pixel size is $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ is successfully measured. The result shows that the ratio of the standard deviation to the average of 6 repeated tests is below 2% within the cutoff frequency of 10 lp/mm. The relative uncertainty of the MTF measurement of the 8×1 linear FPA is below 4.7%.

Key words detectors; modulation transfer function of the device; near infrared; InGaAs; slit method

OCIS codes 040.3060; 000.2170; 040.1240

1 引言

随着器件工艺的发展和航天应用要求的提高,

焦平面阵列(FPA)正越来越多地应用于红外成像系统中。然而,这些成像器件由于受离散采样效应的

收稿日期: 2012-03-29; 收到修改稿日期: 2012-07-03

作者简介: 许中华(1986—),男,博士研究生,主要从事红外焦平面成像和测试等方面的研究。

E-mail: xzh08@mail.sitp.ac.cn

导师简介: 方家熊(1939—),男,研究员,博士生导师,中国工程院院士,主要从事光传感方面的研究。

E-mail: jxfang@mail.sitp.ac.cn

影响,高空间频率受到衰减,并且与较低频率混淆起来,从而限制了成像器件的高空间频率性能。通过测试红外焦平面器件的调制传递函数(MTF),可以了解器件的成像限制,对性能进行较全面的评估。

MTF 定义为输出信号调制度与输入信号调制度的比值,其测试结果常用来表征透镜等连续的光学器件。对于焦平面器件,由于非等晕的存在,其 MTF 测试结果随着输入图像在焦平面列阵上位置的变化而变化,即焦平面器件 MTF 不仅与输入频率有关,而且与输入图像的相位有关,是个多值函数。为解决此问题,国内外学者做了大量的工作^[1~3]。利用离散傅里叶变换(DFT)技术对器件的响应信号进行处理,对于不同初始相位的输入图像,探测器输出有相同的模,避免了非等晕效应;此时得到的器件 MTF 定义为器件的离散 MTF。

离散 MTF 的引入解决了焦平面器件不能用 MTF 来评价的障碍。从 20 世纪 70 年代开始,不断有新的测试方法和测试设备的报道,其中大部分是 CCD 器件^[4~7],也有一些是红外焦平面器件^[8,9]。而在国内,受限于焦平面器件的发展水平,这方面起步比较晚,从 2000 年前后才开始有报道,主要是 CCD 器件 MTF 的测试^[10~14];红外焦平面器件 MTF 的测试,目前所知仅南京理工大学对长波红外单元器件 MTF 有过一些研究^[15,16]。为了满足近红外 InGaAs 焦平面器件的 MTF 测试需求,本文搭建了一套基于狭缝法测试其 MTF 的系统。

2 测试方法介绍

采用扫描狭缝法,可以同时得到待测器件每个光敏元在各空间频率点的 MTF,又能有效避免常见的刀口法测试中干扰大的情况^[17]。其测试原理如图 1 所示。

狭缝目标经光学系统成像在待测器件上,形成一个高像质的狭缝像。通过位移台带动光敏元以亚像元间隔扫过狭缝像,就可以得到该光敏元表征的狭缝像的能量分布,即图 1 下方所示的线扩展函数(LSF)。对 LSF 进行离散傅里叶变换,就可以计算出该光敏元的离散 MTF。将各光敏元依次扫过狭缝像,就可以得到各光敏元的 MTF。

需要说明的是,此时得到的 MTF 是整个系统的 MTF($f_{MTsystem}$),包含了狭缝 MTF(f_{MTslit})、光学系统 MTF($f_{MTOptics}$)和器件本身 MTF(f_{MTdet})的贡献。即

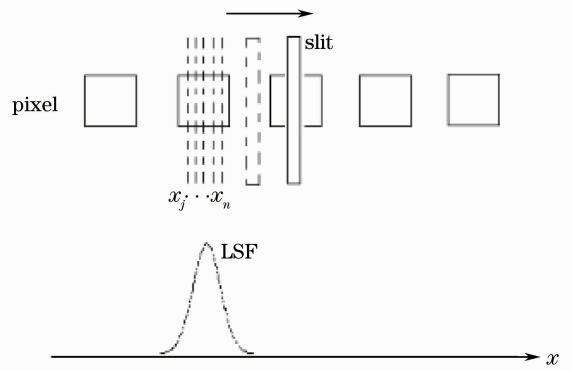


图 1 扫描狭缝法的测试原理

Fig. 1 Principle of slit scan method

$$f_{MTdet} = \frac{f_{MTsystem}}{f_{MTOptics} f_{MTslit}}. \quad (1)$$

从狭缝的宽度可以确定 $f_{MTslit} = \text{sinc}(\pi \nu \cdot g)$,其中 ν 为空间频率, g 为狭缝像方宽度。获得光学系统的 MTF 后,就可以由测得的系统 MTF 算出器件本身的 MTF。

3 测试系统设计

采用扫描狭缝法测试焦平面器件的 MTF,首先要求成像光学系统的成像质量要足够好,MTF 应尽量接近 1,这样才能保证测试系统对结果的影响足够小。选用由两块球面反射镜组成的 Offner 光学系统,其像质在环形视场内接近理想成像^[18],MTF 在较宽的空间频率范围内接近 1,且构造简单紧凑,测试操作相对比较容易。由此构成的测试系统的原理图如图 2 所示。

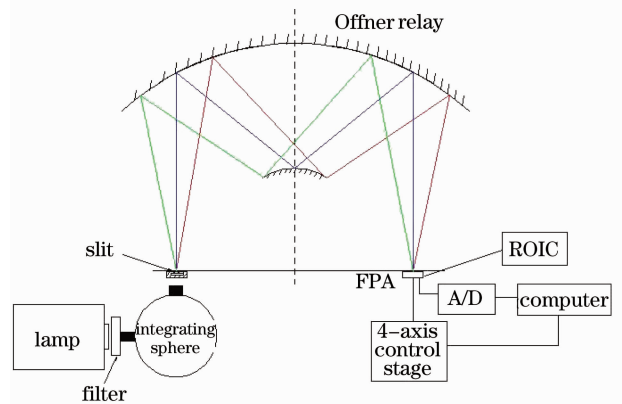


图 2 测试系统原理设计图

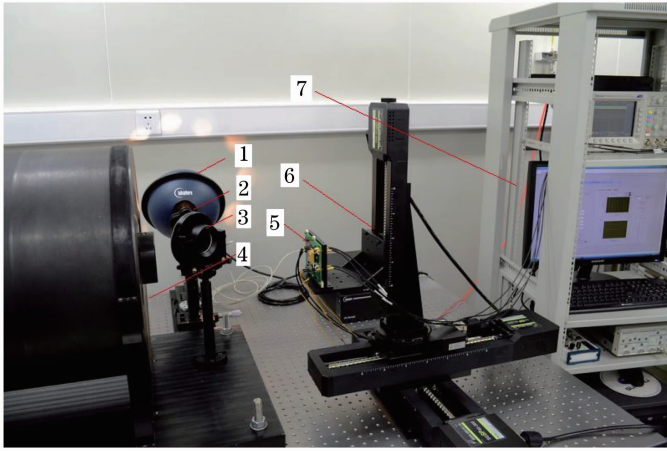
Fig. 2 Schematic design of the measurement system

由图 2 可知,核心部分为 Offner 共轴两反中继光学系统,主镜为凹面反射镜,次镜为凸面反射镜。狭缝目标和待测焦平面器件放置在反射镜球心所在的垂直平面上,相对于主光轴对称分布,系统放大率

为1。照明部分由近红外波段的卤钨灯光源、窄带滤光片和积分球组成,将均匀的近红外波段的窄带光照射到狭缝上。焦平面器件在四维精密位移台的驱动下,对狭缝像进行扫描;驱动电路使焦平面器件

中的读出电路(ROIC)工作,输出信号,经模数(A/D)转换后送入计算机进行数据处理,得到 MTF 曲线。

根据图 2 设计的测试系统如图 3 所示。



- 1: lamp and integrating sphere;
- 2: filter and slit;
- 3: 45° mirror;
- 4: Offner relay;
- 5: sample;
- 6: axes motorized control stage;
- 7: electric equipments and computer

图 3 InGaAs 线列焦平面器件 MTF 测试系统

Fig. 3 MTF measurement system of InGaAs focal plane array

4 成像光学设计及检测结果

图 4 为成像光学系统的实际结构,设计工作波长为 $1.7 \mu\text{m}$ 。主镜为凹面镜,球心为 C_p ,半径为 $R=700 \text{ mm}$,口径为 386 mm ;次镜为凸面镜,球心为 C_s ,半径为 $r=350 \text{ mm}$,口径为 88 mm ; C_p 和 C_s 之间距离为 $\delta=3.85 \text{ mm}$ 。1:1 成像,物和像关于光轴对称,主光线偏离光轴的距离记为 $h, h=103 \text{ mm}$ 。 $\alpha=0.125 \text{ rad}$ 为入射孔径角。像面距主镜球心的距离为 $L_1=703.72 \text{ mm}$,距次镜球心的距离为 $L_2=357.57 \text{ mm}$;与球心所在平面略有错开,以优化像差。

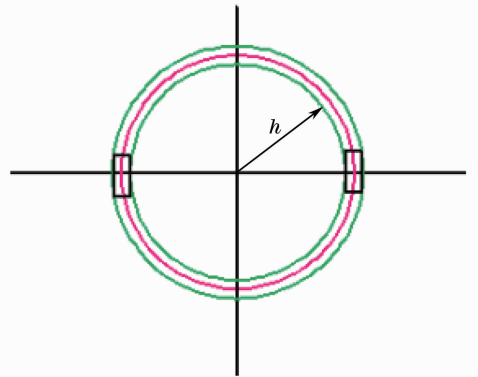


图 5 Offner 结构的视场

Fig. 5 Field-of-view of Offner relay

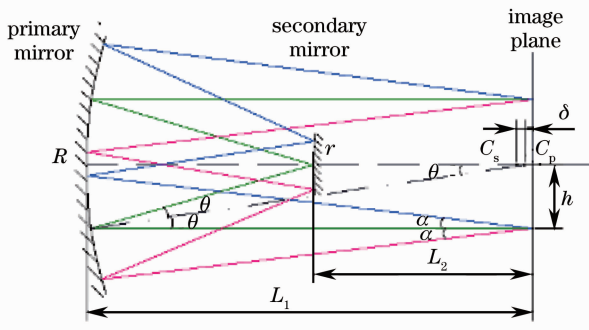


图 4 成像光学结构^[19]

Fig. 4 Optical structure of imaging system^[19]

Offner 结构存在一个像差非常小的细环状视场,如图 5 所示,其中心半径为 $h=103 \text{ mm}$ 。在焦平面器件 MTF 测试时,将特征目标放置在图示的一个矩形视场内,在相对光轴对称的另一个矩形视场内用待测器件接收特征目标的像进行分析。

用 Code V 软件对视场进行分析,可以看到在 20 lp/mm 处,工作波长为 $1.7 \mu\text{m}$, MTF 大于 0.8 的视场范围高达 $8 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。实验室现有的 InGaAs 焦平面器件中,线列器件最大尺寸为 $17 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$ (668×1 , 光敏元尺寸 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$),面阵器件最大尺寸为 $3.2 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ (64×16 , 光敏元尺寸 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$)。因此,设计的 Offner 结构可以保证测试 MTF 时,所有线列和面阵器件均处于其衍射受限视场内。

利用激光干涉仪对加工装校后的 Offner 系统进行检测。将测得的波前差数据在 Code V 中进行计算,得到 Offner 结构在 $1.7 \mu\text{m}$ 下的 MTF(此时视场为狭缝安装位置视场)如表 1 所示(详细计算过程见参考文献^[19])。由表 1 可知,在 20 lp/mm 处

(对应的芯片尺寸为 $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$), Offner 结构的实际 MTF 高于 0.8(工作波长为 $1.7\ \mu\text{m}$), 接近

衍射极限。利用表 1 的数据, 就可以根据(1)式剔除光学系统 MTF 对测试结果的影响。

表 1 Offner 结构的 MTF($\lambda=1.7\ \mu\text{m}$)

Table 1 MTF of Offner relay ($\lambda=1.7\ \mu\text{m}$)

Frequency / (lp/mm)	Diffraction limit formula $f/3.969$	Actual		Focus postion 0.00000	
		X	Y	X	Y
0	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
1	0.991	0.991	0.991	0.991	0.991
2	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983
3	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974
4	0.966	0.965	0.965	0.965	0.965
5	0.957	0.957	0.957	0.956	0.956
6	0.948	0.948	0.948	0.947	0.948
7	0.940	0.939	0.939	0.939	0.939
8	0.931	0.931	0.931	0.930	0.930
9	0.923	0.922	0.922	0.921	0.922
10	0.914	0.913	0.913	0.912	0.913
11	0.906	0.905	0.905	0.903	0.904
12	0.897	0.896	0.896	0.894	0.896
13	0.888	0.888	0.888	0.885	0.887
14	0.880	0.879	0.879	0.877	0.878
15	0.871	0.870	0.870	0.868	0.870
16	0.863	0.862	0.862	0.859	0.861
17	0.854	0.853	0.853	0.850	0.852
18	0.846	0.844	0.844	0.841	0.843
19	0.837	0.836	0.836	0.832	0.835
20	0.829	0.827	0.827	0.823	0.826

5 8 元 InGaAs 线列探测器 MTF 测试

5.1 测量过程及结果

如图 3 和图 6 所示, 在搭建的测试系统上对 8 元 InGaAs 线列探测器进行了 MTF 测试。8 元 InGaAs 线列探测器的标称光敏元尺寸为 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$, 光敏元中心间距为 $100\ \mu\text{m}$, 对应的标称截止空间频率为 $10\ \text{lp/mm}$ 。使用的狭缝宽度为 $50\ \mu\text{m}$, 扫描步长为 $4\ \mu\text{m}$; 每扫过一个步长, 分别采集各光敏元的 50 次连续输出, 平均后作为该位置下该光敏元的输出。扫描完成后, 各位置下的输出就构成了该光敏元的 LSF 曲线。对扫描得到的 LSF 曲线进行单次高斯拟合以抑制噪声的影响; 对拟合后的 LSF 曲线进行离散傅里叶变换并在零频处归一化, 就可得到(1)式中的系统 MTF。剔除光学系统 MTF 和狭缝 MTF 影响后, 最终得到该光敏元的 MTF。当待测器件从左到右整个扫过狭缝像后, 可以同时得到待测器件每个光敏元的 MTF。

图 7 为 8 元 InGaAs 线列探测器编号 1 的光敏元的 MTF 测试结果, 对扫描得到的 LSF 进行单次

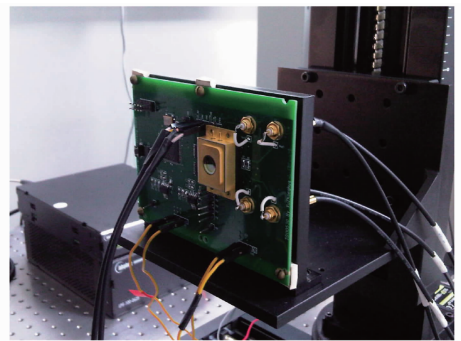


图 6 8 元 InGaAs 线列探测器 MTF 测试实验

Fig. 6 MTF measurement of an 8×1 InGaAs linear detector

高斯拟合的拟合系数 $R^2=0.9897$ 。

在同样的实验条件下对探测器进行了 6 次重复测试, 以编号 1 的光敏元结果为例, 得到 6 次测试的 MTF 曲线如图 8 所示。

由图 8 可知, 6 次测试得到的 MTF 曲线非常接近。在标称截止频率 $10\ \text{lp/mm}$ 内, 6 次测试结果的标准偏差与均值之比小于 2%, 表明测试系统的重

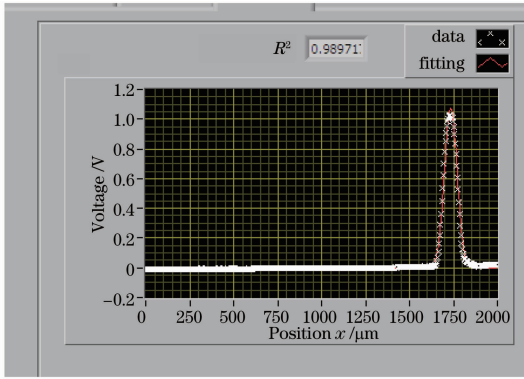


图7 光敏元1的MTF测试结果

Fig. 7 Results of MTF measurement of pixel 1

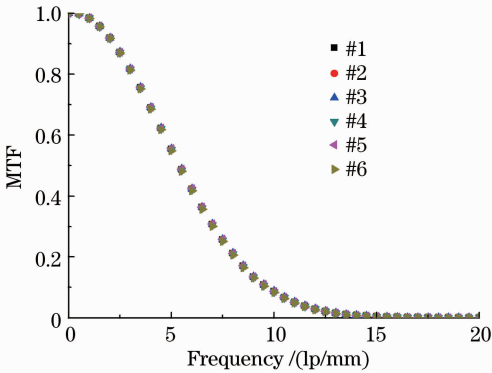


图8 光敏元1的6次MTF测试结果

Fig. 8 Results of 6 repeated MTF measurements of pixel 1

复性是比较理想的。

5.2 测量的不确定度分析

从(1)式可知,测量器件MTF的误差主要来自3个方面:1)测量整个系统MTF过程中的误差;2)获取的光学系统MTF数据的误差;3)狭缝制造误差引起的狭缝MTF计算误差。于是有

$$\left| \frac{\Delta f_{\text{MTdet}}}{f_{\text{MTdet}}} \right| = \sqrt{\left(\frac{\Delta f_{\text{MTsystem}}}{f_{\text{MTsystem}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta f_{\text{MTOptics}}}{f_{\text{MTOptics}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta f_{\text{MTslit}}}{f_{\text{MTslit}}} \right)^2}. \quad (2)$$

对扫描得到的原始LSF进行高斯拟合的公式

为 $f(x) = a \times \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$, 则

$$f_{\text{MT}}(\nu) = \frac{|\mathcal{F}[f(x)]|}{|\mathcal{F}[f(x)]|_{\nu=0}} = \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma^2\nu^2\right). \quad (3)$$

由(3)式推出

$$\left| \frac{\Delta f_{\text{MTsystem}}}{f_{\text{MTsystem}}} \right| = 2 \left| \ln[f_{\text{MT}}(\nu)] \right| \times \left| \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right|, \quad (4)$$

式中 $|\Delta\sigma/\sigma|$ 是高斯拟合参数 σ 的相对不确定度,包含了器件输出电压不确定度和拟合算法本身不确定度的综合贡献。从对8元线列器件的重复测量结果知,

拟合相关系数 R^2 在0.96以上时, $|\Delta\sigma/\sigma| < 1\%$ 。

对8元线列InGaAs器件,在标称截止频率10 lp/mm内,MTF大于0.1。代入(4)式得

$$\left| \frac{\Delta f_{\text{MTsystem}}}{f_{\text{MTsystem}}} \right| < 4.6\%, \quad (5)$$

对成像光学系统MTF的重复测试实验给出,在10 lp/mm范围内,

$$\left| \frac{\Delta f_{\text{MTOptics}}}{f_{\text{MTOptics}}} \right| \leq 0.15\%, \quad (6)$$

$$\left| \frac{\Delta f_{\text{MTslit}}}{f_{\text{MTslit}}} \right| = \left| \left[1 - \frac{\pi\nu g}{\tan(\pi\nu g)} \right] \right| \times \left| \frac{\Delta g}{g} \right|, \quad (7)$$

式中 $|\Delta g/g| \leq \frac{3\ \mu\text{m}}{50\ \mu\text{m}} = 6\%$ 为狭缝的宽度相对不确定度。从而在10 lp/mm内,

$$\left| \frac{\Delta f_{\text{MTslit}}}{f_{\text{MTslit}}} \right| \leq 0.81\%. \quad (8)$$

将(5)、(6)、(8)式代入(2)式,得 $\left| \frac{\Delta f_{\text{MTdet}}}{f_{\text{MTdet}}} \right| < 4.7\%$ 。

6 结 论

针对近红外InGaAs线列焦平面器件MTF的测试需求,设计并搭建了基于扫描狭缝法的器件MTF测试系统。设计并加工了一套高像质的全反射式Offner光学结构作为成像光学,对成像光学的实测结果表明,1.7 μm下,在高达8 mm×30 mm的宽视场内,20 lp/mm处的MTF高于0.8,接近衍射极限;其较宽的视场和高的成像像质可以满足当前及未来几年InGaAs线列和小面阵器件的测试需求。使用该MTF测试系统对8元InGaAs线列探测器进行测试,6次重复实验得到的MTF数据的标准偏差与均值之比在截止频率10 lp/mm内小于2%,表明测试系统的重复性是较为理想的。MTF测量的不确定度在10 lp/mm范围内小于4.7%。MTF测试系统的建立为研究近红外器件的MTF提供了可靠的手段。

参 考 文 献

- 1 A. H. Lettington, Q. H. Hong, J. MacDonald *et al.*. Measurement of the MTF and the MRTD for focal plane arrays [C]. *SPIE*, 1993, **1969**: 217~224
- 2 W. Wittenstein, J. C. Fontanells, A. R. Newbery *et al.*. The definition of the OTF and the measurement of aliasing for sampled imaging systems[J]. *Opt. Acta*, 1982, **29**(1): 41~50
- 3 S. K. Park, R. Schowengendt, S. A. Kaczynski. Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(15): 2572~2582
- 4 D. H. Seib. Carrier diffusion degradation of modulation transfer

- function in charge-coupled imagers[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1974, **21**(3): 210~217
- 5 G. Eric, A. Stevens. Unified model of carrier diffusion and sampling aperture effects on MTF in solid-state image sensors [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1992, **39**(11): 2621~2623
- 6 W. Buchtemann. Modulation transfer function of extrinsic Si-detector arrays affected by optical crosstalk[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1980, **27**(1): 189~193
- 7 B. M. Lambert, J. M. Harbord. Experimental methods for measurement of the modulation transfer function (MTF) for time-delay-and-integrate (TDI) charge coupled device (CCD) image sensors[C]. *SPIE*, 2009, **7405**: 74050M
- 8 M. M. Coakley, G. D. Berthiaume, E. J. Ringdahl *et al.*. Optical performance measurements of large IR focal plane arrays for GOES[C]. *SPIE*, 2000, **4135**: 129~139
- 9 A. Lengwenus, P. Erichsen. MTF measurement of infrared optical systems[C]. *SPIE*, 2009, **7481**: 74810V
- 10 Gong Faquan. Study on Optical Modulation Transfer Function of CCD and Its Measuring Method [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002
公发全. CCD光学调制传递函数及检测方法研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002
- 11 Ma Weihong. Study of MTF Measurement Technique Based on Image Analysis [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005
马卫红. 基于图像分析的光学传递函数测试技术研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2005
- 12 Jiang Xiaoguo, Tan Zhao, Li Zeren *et al.*. The study on the factors affecting CCD modulated transfer function [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 830~833
江孝国, 谭肇, 李泽仁等. 影响 CCD 调制传递函数因素研究 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(7): 830~833
- 13 Feng Zhiwei, Cheng Haobo, Song Qian *et al.*. Modulation transfer function measurement of electron multiplying CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1710~1716
冯志伟, 程灏波, 宋谦等. 电子倍增电荷耦合器件的调制传递函数测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1710~1716
- 14 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
- 15 Zhang Zhiheng. Study on MTF Measurement System and Technique of Infrared Focal Plane Arrays[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology, 2004
张志恒. 红外焦平面阵列 MTF 测试系统和技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2004
- 16 Chen Bing. Study on MTF Measurement Technology of Cooled HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology, 2002
陈冰. HgCdTe 致冷红外焦平面阵列 MTF 测试技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2002
- 17 Hao Qun, Sha Dingguo, Zheng Naimei. The calculation and analysis of knife-edge and slit scanning in OTF measuring equipment[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(1): 41~43
郝群, 沙定国, 郑乃梅. 光学传递函数测量仪刀口和狭缝两种扫描方法比较分析[J]. *光学技术*, 2001, **27**(1): 41~43
- 18 Huang Yuanshen, Ni Zhengji. Research of the concentric three-reflection optical system[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(2): 42~46
黄元申, 倪争技. 同心三反射镜光学系统研究[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(2): 42~46
- 19 Xu Zhonghua, Wang Jing, Zhao Longcheng *et al.*. An all-reflective optical system for the modulation transfer function measurement of near-infrared focal plane arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s116002
许中华, 王敬, 赵龙成等. 测试近红外焦平面传递函数的全反光学系统[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s116002

栏目编辑: 何卓铭