

基于焦平面探测器的红外相机成像模型和静态传函测试方法研究

孔 健^{1*}, 傅雨田², 赵跃进¹

(1. 北京理工大学 光电学院 精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:建立了基于焦平面探测器的红外成像系统成像的空间域和频率域模型;并分析指出,由于背景辐射的存在和红外探测器明显的响应非均匀性,只有系统经过良好的辐射校正,方能使其成像过程符合线性和空间不变性条件,使得相机可以采用传递函数来评价其几何成像性能。提出了针对基于焦平面探测器的红外成像系统的传函测试方法,能够有效地处理背景辐射的影响而且不受系统不均匀性的影响,试验和应用实践显示了该方法的有效性。

关键词:红外成像;模型;传函;测试

中图分类号:O43 文献标识码:A

Research on imaging model of infrared camera with focal plane detector and its MTF measuring method

KONG Jian^{1*}, FU Yu-Tian², ZHAO Yue-Jin¹

(1. Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academia of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Imaging Model in space domain and frequency domain of an infrared camera with focal plane detector is established. It shows that because of the existence of back ground radiance and non-uniformity the geometrical performance of an infrared camera can be evaluated by MTF only when the camera is well-corrected and the linearity and space invariance condition is satisfied. An MTF measurement method of an infrared camera using focal plane detector is given. This method does not depend on the well correction of the camera and can avoid the deviation from the background radiance.

Key words: infrared imaging, model, modulation transfer function (MTF), measure

前言

调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF, 简称传函) 是反映空间红外相机几何分辨能力的指标,也是评价相机的核心指标之一。在相机发射前,通常采用实验室静态传函来评判相机的几何分辨性能。另外,实验室静态传函也是相机实验室光电联调过程中判断探测器组件是否与光学系统匹配良好的关键判据。因此,一种快速而且准确的相机系统实验室传函测试方法是非常重要的。

随着以电荷耦合元件 (Charge Coupled Device, CCD) 为核心的高分辨率光电遥感相机的发展,在相机传函测试技术方面也有大量的研究。中科院长春光机所官明朕等的 CCD 相机成像系统调制传递函数测量方法的研究^[1-2],提出了对倾斜刃边法的一些改进;北京空间机电研究所郭悦等提出了在 TDICCD 相机传函测试中采用数字图像处理的方法^[3]。也有不少研究将相机传函测试从实验室的静态测试拓展到在轨的动态测试,例如中科院长春

机所李宪圣等研究提出了一种可准确测试大气传递函数和不含大气的在轨传递函数的方法^[4],中国科学院安徽光学精密机械研究所徐伟伟提出通过亚像元位置检测与参数化模型拟合等,对星载相机进行了在轨MTF检测^[5],西安工业大学于洵提出了针对光电系统振动条件下的动态调制传递函数的测量方法^[6]。除了测量方法的研究,还有不少测试仪器方面的研究成果,例如西安应用光学研究所姜昌录等研制了光电成像系统动态调制传递函数测量装置^[7]。另外,还有不少从关键的CCD器件的传函特性及其测试着手的研究,例如中国电子科技集团公司第41研究所王恒飞等提出了将动态定焦技术应用于CCD器件调制传递函数测量中^[8]。还有许多工作进一步拓展到微光成像等相关领域,例如南京理工大学的陈一鸣等提出了电子倍增CCD成像系统调制传递函数测量及优化方法^[9]。总体上,针对采用CCD或TDICCD的可见光相机的成像模型和传函测试方法研究相对成熟^[10-13],有一些理论和方法可以借鉴到红外系统传函测试上。

随着各个波段红外焦平面探测器的发展,越来越多的红外系统也采用类似CCD的红外焦平面探测器^[14-16]。例如上海技物所傅雨田团队研制的天宫一号超光谱成像仪热红外通道采用了线阵长波红外焦平面探测器^[17],高分四号卫星装载了采用中波红外面阵探测器的凝视相机。上海技术物理研究所张瞳等研究了红外焦平面探测器的传函表征方法^[18]以及相关的改善方法^[19],电子科技大学王敬辉等也开展了红外焦平面MTF和串音测试技术研究^[20],中国科学院上海技术物理研究所钟篱等开展了HgCdTe红外焦平面阵列像素内灵敏度函数仿真研究^[21],也能够为探测器的传函表征提供理论依据。但总体上,对红外焦平面探测器MTF特性的研究比较多^[22-27],对红外相机系统的模型和传函测试的研究比较少。

虽然从基本原理上采用焦平面探测器的红外成像系统和采用CCD探测器的可见光成像系统是相近的,但因为红外系统的背景辐射、红外焦平面探测器比较明显的暗电流、非均匀性等特点,使得红外系统的成像模型和传函测试方法都需要开展专门的研究。另外如上文所述,我们不仅将传函作为系统性能的评价指标,还常常希望以系统静态传函作为仪器研制过程中系统装调是否最优的判据。为此,需要有一种对相机的红外背景辐射和非均匀

性不敏感的测试方法来测量相机系统的传函。本文提出基于基准像素对相移输入测试的红外推扫或凝视相机实验室传函测试方法,该方法基于系统成像模型,利用移动的矩形靶标,采用逐像素测试的方法测试随机视场的实验室静态传函,这种方法不仅可以用来评价相机的性能,也可以准确便捷地指导系统装调。

1 基于焦平面探测器的红外相机成像模型

1.1 相关理论基础和限制

基于线性和空间不变性条件的成像系统理论,将红外相机系统在空间域对单位幅度正弦信号输入的响应作为相机系统的传递函数,它是空间频率的函数。从物理上,实验室测试的系统传函与光学系统、传感器,以及系统处理电路有关。可以认为整个红外相机是一个级联的线性空间不变系统,才可以有测试系统对不同频率正弦输入的响应的方法来进行系统传函的测试;也可以通过测试系统对频率丰富的复合靶标的响应,通过傅里叶分析的方法获取系统的传函。而作为一个具有有限采样频率的红外相机^[28],从更实用的角度,通常更关注在相机奈奎斯特频率处的传函,常常以此作为一个典型值来反映系统的传函水平。

事实上,上述的线性和空间不变性的理论基础只能近似满足。对一个实用的光学系统来说,不可能在全视场有一个严格一致的点扩散函数,我们可以通过分区域评价的方法,在局部小视场范围内和一定的空间频率范围内近似认为光学系统是空间不变的。但多元红外探测器由于多元探测器响应的不一致性,导致探测器的特性偏离空间不变性,而必须要经过必要的校正,才能将红外探测器在低于探测器采样频率的范围内近似认为具备空间不变性^[29]。

另外,红外相机内部背景辐射的存在,也会在一定程度上破坏其空间不变性的特性,但这也是可以通过校正来很大程度上加以消除的

对于一个校正良好的红外相机系统传函的测试,从上述基本原理出发,可以为相机提供一个已知空间频率分布的复合频率输入,通过相机对其响应的分析,一定可以获取该相机的传函,包括必要的频率分布及其典型的奈奎斯特频率处的传函。对于一个红外相机来说,这种良好的校正,包括对系统响应非均匀性的处理、系统背景辐射的处理等复杂的过程,而相机的非均匀性特性、背景辐射特

性^[30]需要在相机系统装调完成后才能准确获取。

1.2 红外相机的辐射响应模型

无论红外相机工作中波或长波波段,目前的相机一般采用线阵焦平面探测器推扫成像或面阵焦平面探测器凝视成像。红外探测器的输出包括两个部分,一部分是对目标辐射的响应;另一部分是与目标无关的信号,后者包括探测器暗电流等,也包括红外系统的背景辐射,红外背景辐射的存在是红外系统一个主要的特点。以此,可以由下式来表示一个红外探测器在系统中的输出 V_{idout}

$$V_{idout} = V_{ireset} + V_{idark} + R_i \times (P_{ibg} + k_i P_{it}) \quad (1)$$

其中 V_{ireset} 为探测器各像素的复位电平; V_{idark} 为探测器各像素的暗电流电平, R_i 为探测器各像素的辐射响应率; P_{ibg} 为探测器接受的背景辐射功率; k 是光学系统的传输系数; P_i 为目标在入瞳处的辐射功率; i 为像素编号。

相机的信号调理和量化处理是线性的,可以处理掉一部分直流的复位信号和暗电平,不会改变像素之间的相对关系。因此,可以得到相机系统在校正前的响应 N_{idout} 表达式为:

$$N_{idout} = N_{idark} + R_i \times (P_{ibg} + k_i P_{it}) \quad (2)$$

其中 N_{idark} 为相机系统包含了探测器复位电平、暗电流、信号调理电路的直流偏置以及增益构成的原始图像的本底; R_i 为包含了探测器辐射响应率和信号调理电路增益在内的系统响应率; i 同样为像素编号。

红外系统对图像辐射校正基本采用线性或分段线性的校正方法,通过这样的校正,一方面可以消除响应的不均匀性,同时可以消除不均匀的相机内部背景辐射、不均匀的暗电流等各方面带来的图像不均匀性;从成像系统的角度,校正后的系统也能够更好地满足空间不变性的条件,使得采用传函来衡量成像几何特性在理论上变得合理。

1.3 红外相机的成像模型

根据上述的红外系统辐射响应模型,可以进一步建立系统的成像模型。该系统主要分两个过程,第一个是光学成像过程,第二个过程是红外焦平面探测器的离散采样和光电转换。

在红外系统的光学成像过程中,除了遵循线性空间不变系统的经典点扩展函数 $h_{id}(x', y')$ 卷积外,还需要叠加一个背景光场分布 $I_b(x', y')$, 于是这一过程可以表征为:

$$I(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} I_o(x, y) h_{id}(x' - x, y' - y) dx dy + I_b(x', y') \quad (3)$$

记作:

$$I(x', y') = I_o(x', y') * h_{id}(x', y') + I_b(x', y') \quad (4)$$

其中 $I(x', y')$ 为像方的光强分布函数。

探测器在光电转换过程中,也存在光电子扩散等机理导致的串音现象,简化认为这一现象在一定范围内是均匀的,可以用一个类似点扩散函数的 $h_{id}(x', y')$ 来描述。

对于红外探测器来说,不均匀的辐射响应系数可以在理论上归一化到一个二维函数 $r_u(x', y')$ 来表征,探测器的暗电流会形成一个与输入无关的不均匀暗场信号 $v_d(x', y')$, 这两项直接作用到像方的光学图像,获得理论上的光电图像 $v(x', y')$, 表征如下:

$$\begin{aligned} v(x', y') = & ((I_o(x', y') * h_{id}(x', y')) + \\ & I_b(x', y') * h_{id}(x', y')) * r_u(x', y') + v_d(x', y') \\ = & ((I_o(x', y') * h_{id}(x', y')) * h_{id}(x', y')) * r_u(x', y') \\ & + (I_b(x', y') * h_{id}(x', y')) * r_u(x', y') + v_d(x', y') \end{aligned} \quad (5)$$

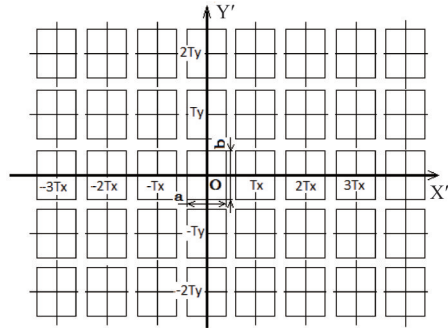


图1 探测器像素布局图

Fig. 1 Pixel layout of focal plane detector

式(5)中,前一项跟输入图像相关,可以记为 $v_i(x', y')$, 后两项跟输入图像无关,可以记作 $v_b(x', y')$; 这样,上述光电图像 $V(x', y')$ 可以表征为:

$$v(x', y') = v_i(x', y') + v_b(x', y') \quad (6)$$

理想探测器在成像过程中分为积分和离散采样两个过程。积分过程是将光敏元面积内的光电子进行收集的过程,可以用 $rect(ax', by')$ 函数的卷积来表征,离散采样则可以用二维冲激采样函数 $comb(T_x x', T_y y')$ 来表征^[28]。

$$comb(T_x x', T_y y') = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x' - mT_x, y' - nT_y) \quad (7)$$

采样后的离散图像可以记作 $n(x', y')$, 可以表征如下:

$$n(x', y') = (v(x', y') * rect(ax', by')) * comb(T_x x', T_y y') \quad (8)$$

$$n(x', y') = (v_i(x', y') * rect(ax', by')) * comb(T_x x',$$

$$T_y y') + (Vb(x', y') * \text{rect}(ax', by')) \\ \times \text{comb}(T_x x', T_y y') \quad (9)$$

式(9)中后一项依然是与输入图像无关的量,可以记为 $n_b(x', y')$ 。由此,上式可以改写为:

$$n(x', y') = (((I_0(x', y') * h_{il}(x', y')) * \\ h_{id}(x', y')) \times r_u(x', y')) * \text{rect}(ax', by') \\ \times \text{comb}(T_x x', T_y y') + n_b(x', y') \quad (10)$$

由此可以得到离散数值图像的表征为一个与输入物方图像有关项和一个与输入物方图像无关的不均匀本底项。

从上述对成像过程的模型分析可见,红外焦平面相机的成像在严格意义上是不满足空间不变性条件的。这主要是由于在成像过程中,多了不均匀的背景辐射项 $I_b(x', y')$ 、辐射响应的不均匀性项 $h_{id}(x', y')$ 、不均匀暗电流 $v_d(x', y')$ 和二维焦平面探测器的离散采样过程。

但为了研究、评价一个红外焦平面相机系统,我们可以通过一些校正和近似,使得相机在一定的精度下符合线性空间不变性,可以用传函等特性来描述和评价系统的特性。

一般认为,红外相机的背景辐射可以与可见光相机的杂散光类比,虽然强度上可能大得多,但可以认为在一个小的区域内是分布比较均匀的,但暗电流和响应非均匀性就完全不同,导致的图像强度分布呈现离散性和随机性,会导致系统成像过程偏离空间不变的特性,必须进行校正。

对红外系统的辐射校正通常采用线性校正的方法^[30],通过不同的辐射标定方法获取一组数据 $A(x', y')$ 和 $B(x', y')$,对图像进行校正消除其非均匀性。其过程如下式表征:

$$n_c(x', y') = A(x', y') \times (((I_0(x', y') * h_{il}(x', y')) * \\ h_{id}(x', y')) \times R_u(x', y')) * \text{rect}(ax', by') \times \text{comb} \\ (T_x x', T_y y') + A(x', y') \times N_b(x', y') + B(x', y') \quad (11)$$

经过上述的校正,将使得 $A(x', y') \times R_u(x', y')$ 项成为常数项 A , $A(x', y') \times N_b(x', y') + B(x', y')$ 成为常数项 B ,整个成像模型转化为:

$$n_c(x', y') = A(((I_0(x', y') * h_{il}(x', y')) * h_{id}(x', y')) \\ * \text{rect}(ax', by')) \times \text{comb}(T_x x', T_y y') + B \quad (12)$$

式(12)表明:采用二维面阵红外焦平面探测器的红外相机由于焦平面探测器的作用,使得图像在空间上离散,并直接决定了相机的像元分辨率,或从频域的角度,决定了相机的奈奎斯特频率,而这也是我们最关心的特征频率。

一个实际的成像系统的空间不变性是针对一定精度的,这实际上也使得经过探测器采样的离散图像可以在一定的精度范围内被当作具备空间不变性。从式(12)看,可以认为满足空间不变性的空间域精度为采样间隔,在两个维度分别为 T_x 和 T_y 。

为了简化表达式,用 $v_0(x') = I_0(x') * h_{il}(x')$ * $h_{id}(x')$,式(12)可以简化为:

$$n_c(x', y') = A(v_0(x', y') * \text{rect}(ax', by')) \\ \times \text{comb}(T_x x', T_y y') + B \quad (13)$$

上式是一个采用红外焦平面探测器的红外成像系统的成像(包括校正)模型在空间域的表达,由此可以进一步可以得到其频率域的表达。对式(13)两边进行傅里叶变换,可以得到频域的成像变换过程如下:

$$N_c(u', v') = A((V_0(u', v') \times \text{sinc}(u'/a, v'/b)) \\ * \text{comb}(u'/T_x, v'/T_y)) \quad (14)$$

对比上述的空间域分析,在频率域的情况是对应的。成像系统在空间域的采样周期 T_x 和 T_y 对应频率域的采样周期 $1/T_x$ 和 $1/T_y$,空间域探测器像素的 rect 函数积分效应对应频域的 sinc 函数图像带宽限制。

上述分析显示,经过非均匀性校正后的红外系统在成像模型上符合线性和空间不变性要求,可以用传函来表征其几何成像性能,也可以用比较经典的方法来测试系统传函。

2 基于焦平面探测器的红外相机静态传函测试

2.1 基于焦平面成像的相机静态传函测试的基本原理

成像系统的几何性能,特别是几何分辨能力,主要通过像元分辨率和奈奎斯特频率下的静态传函来表征,所以这两个参数需要在实验室测试。

基于上一节的分析论证,经典的方法是通过分析比对相机系统对输入典型目标的输出来获取相机系统的传函,这样的典型目标常常有点目标、线目标、刃边目标以及正(余)弦目标或矩形目标等^[4]。实际测试中我们往往最关心系统在奈奎斯特频率下的静态传函,则采样奈奎斯特频率下的正弦靶标最为直接,但由于正(余)弦靶标难以获得,常常采样相同频率的矩形靶标。

对于理论的正(余)弦靶标作为输入,系统调制传递函数为输出正弦信号的对比度与输入正弦信号对比度的比,若输入正弦信号的理论对比度为1,

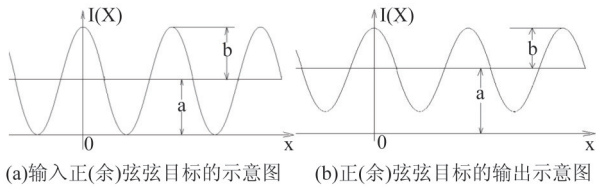


图2 采用正(余)弦目标测试传函的示意图

Fig. 2 MTF measurement based on sinusoidal(cosine) input

则系统调制传函 MTF 的测试结果为:

$$MTF = b/a \quad (15)$$

理论上矩形靶标可以用矩形函数序列来表征如下^[3]:

$$f(x) = \text{rect}(x) * \text{comb}(x) = 1/2 + (2/\pi)(\cos(kx) + (1/3)\cos(3kx) + (1/5)\cos(5kx) \dots) \quad (16)$$

其中 $k = 2\pi/d$ 。

将这个矩形函数序列进行傅里叶展开可以得到其频谱,其基波对比度为 $4/\pi$,三次谐波的对比度为基波的 $1/3$,但由于光学系统的口径限制,三次谐波的频率一般会很接近光学系统的截止频率,幅度会被大幅衰减;而更高频次的谐波则一般会在光学系统截止频率以外。所以,采用矩形靶标的谐波输入基本不影响在系统输出中对基波对比度的检测。由此,矩形函数作为输入的测试方法,MTF 的计算公式如下:

$$MTF = (\pi/4) \times (b/a) \quad (17)$$

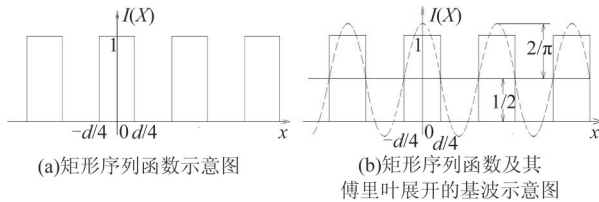


图3 矩形序列函数及其傅里叶展开的基波示意图

Fig. 3 rectangular pulse array and the base wave of its Fourier expansion

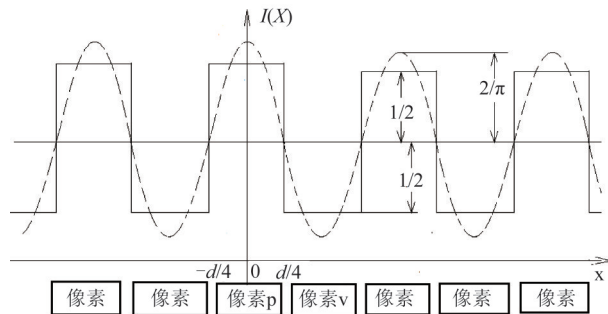


图4 矩形序列函数的输出与采样匹配示意图

Fig. 4 Output of rectangular pulse array and its matching with pixel sample

在测试中,只要探测器像素和矩形靶标像在相位上有良好的匹配,可以通过静态成像数据的处理获取系统的静态传函,具体计算公式如下:

$$MTF = (\pi/4) \times (N_p - N_v) / (N_p + N_v) \quad (18)$$

其中 N_p 为像素 P 的值, N_v 为像素 V 的值。

2.2 采用焦平面探测器的红外相机 MTF 测试中的背景辐射处理

上述的测试原理对于采用焦平面探测器的红外相机也是适用的。但除非相机的光机系统和靶标均处于足够低的温度,相机的背景辐射和矩形靶标的辐射均会在测试中产生影响。

对于红外波段由于靶标本身热辐射的存在,用黑体照明的矩形靶标构成的输入辐射信号的表征如下:

$$f(x) = R + \text{rect}(x) * \text{comb}(x) = R + 1/2 + (2/\pi)(\cos(kx) + (1/3)\cos(3kx) + (1/5)\cos(5kx) \dots) \quad (19)$$

靶标本身的辐射增加了一项零频的输入,这可以考虑将靶标降温到其辐射强度可以忽略的程度,但这将使得测试系统复杂化;也可以通过数据处理的方法解决这一问题。

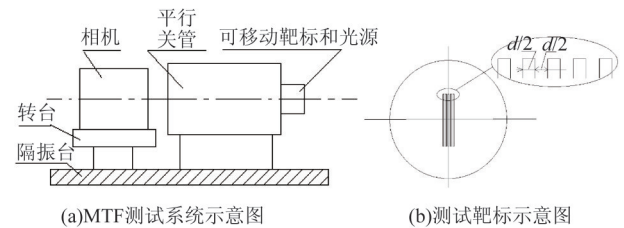
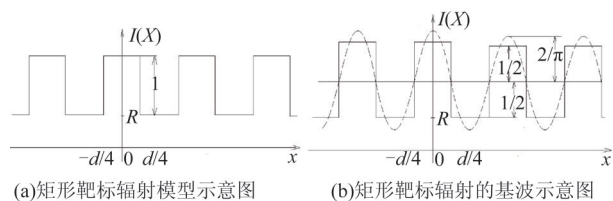


图5 MTF 测试系统和狭缝靶标

Fig. 5 MTF measurement system and its slit board

实际上针对一个采用红外焦平面的成像系统,测试时需要采用平行光管将靶标辐射耦合到相机系统内,除非工作在足够低的温度,平行光管等设备的辐射也会形成一个背景辐射影响测试,也可以将其与靶标的辐射一样处理,这样在测试系统为相机提供的测试输入的 R 项信号中,还包含来自平行光管等测试设备的辐射。

针对一个采用红外焦平面的成像系统,测试时还需要做到相机焦平面像素和靶标像的相位匹配以获取靶标图像,提取靶标图像的对比度,并进一步计算得到相机系统的静态传函。这种匹配可以通过在平行光管焦面上的靶标平移来实现。在完成匹配后,可以得到如图 7 的采样模型和式 20 的计算方法。



(a)矩形靶标辐射模型示意图 (b)矩形靶标辐射的基波示意图

图6 红外狭缝靶标的辐射模型及其傅里叶基波

Fig. 6 Infrared radiation mode of a slit target and its Fourier base wave

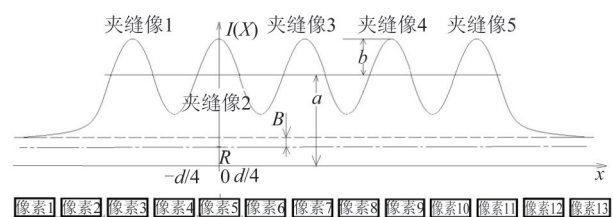


图7 红外狭缝靶标的采样模型

Fig. 7 Sampling model of an infrared slit target

$$MTF = (\pi/4) \times (a - B - R) = (\pi/4) \times (N_5 - N_6) / (N_5 + N_6 - 2 \times N_1) \quad (20)$$

其中 N_i 为第 i 像素的值

式(20)中, R 反映的是靶标本身的辐射, B 则反映了包括光机系统背景辐射、探测器暗电流等待, 与式(13)中与输入无关的像 B 是一致的。

在实际操作中, 需要采集狭缝像的峰值 N_5 和谷值 N_6 以及基准值 N_1 , 并按式 20 计算。

上述对红外背景辐射的基准值的采集和处理在空间域解决的是成像数据的基准问题, 而在频率域就是零频的剔除和对奈奎斯特频率的采样。

必须说明的是, 上述测试方法及其数据处理涉及探测器的多个像素, 但并未考虑像素辐射响应的不一致性。由此, 这些数据必须是在经过良好的辐射校正以后的数据, 而这种方法也只能适合状态稳定并经过良好的辐射标定的相机系统。

2.3 基于基准像素和靶标相移的红外相机实验室传函测试方法

在实际红外焦平面成像系统的研制过程中, 需要在不同的阶段进行调制传递函数的测试, 特别是在系统装调阶段, 还无法进行相机的相对辐射标定来获取非均匀性校正系数, 相机还无法进行辐射校正。例如在相机的电校阶段, 需要通过系统的典型视场静态调制传递函数的最优化来调整并确定光学系统和探测器的最佳匹配, 但这个阶段的成像数据未经辐射校正, 成像模型不满足空间不变性条件。为此, 设计了一种基于基准像素和靶标相移的

方法实现测试系统典型视场静态传函的方法。

一般的相对辐射校正是一个基准像素, 或虚拟的基准像素, 其他像素的辐射响应系数通过校正归一到该基准像素。因此, 在测试某个局部视场的静态传函时, 可以指定一个典型像素作为基准像素, 测试中这一像素对靶标的响应可以认为与系统辐射校正后端响应是一致的, 而其周边像素经过校正后的响应与这一基准像素一致, 并可以用该基准像素替代周边像素来采集像面的靶标像, 具体实现的方法可以将靶标适当移动, 使得这个基准像素可以采样到完整的靶标像。

在理论上, 这种在空间域的目标平移相当于在频域的相移, 而这种相移使得这一基准像素可以通过时间序列来完整地采样靶标图像, 并由此计算得到成像系统的静态传函, 而且这样得到的传函与相机在具有良好辐射校正条件下静态获得的系统静态传函是一致的。

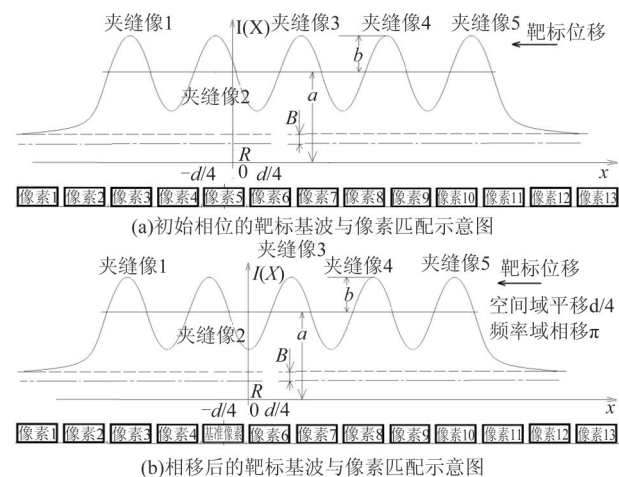


图8 相对基准像素的靶标相移示意图

Fig. 8 Phase shift of slit image relative to the reference pixel

实际测试可以采取靶标在某一区域连续反复扫描的方法对某一视场多次采样测试该靶标移动而形成的图像序列可以表征为一系列空间域平移、频率域相移的时间序列图像, 其数学表征如下:

$$F\{f(x+tv)\} = e^{j\omega t v} F(u) \quad u = 2\pi/x \quad (21)$$

其中 t 为时间, v 为靶标运动速度

实际测试中, 可以读取狭缝扫描获得的基准像素的时间序列信号中的峰值 N_p 和谷值 N_v 以及基准值 N_b , 并按公式(17)计算得到测试结果。为了控制靶标的运动模糊, 需要控制靶标的运动速度足够慢, 确保在测试数据采集, 在一次曝光时间内靶标的运动距离不大于像素的 $1/20$ 。

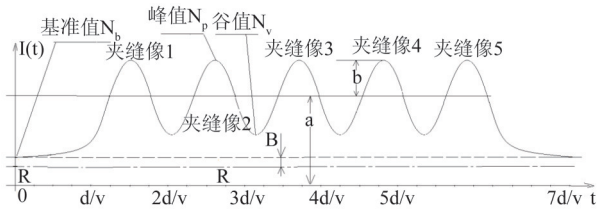


图9 狭缝扫描获得的基准像素的时间序列信号

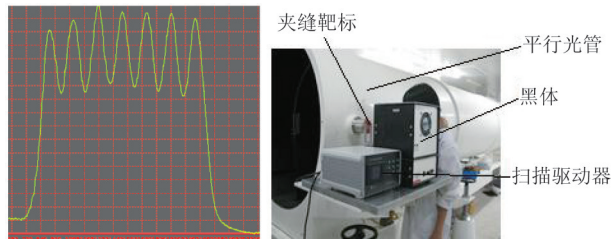
Fig. 9 Time serial data by scanning slit image

相比传统的完全静态的测试方法,采用基准像素和靶标相移的方法在测试精度上也有所提高。采用静态方法测试一个点的传函至少需要采用两个像素的数据,这两个像素之间的不均匀性校正残差会在传函测试结果中引入一个系统误差。从目前水平看,校正良好的红外系统相邻像元的不均匀性残差在0.1%~0.5%的水平,由此引入的传函测试误差会大幅放大,尤其在测试靶标图像对比度比较低的条件下,该误差可能超过5%,达到不可忽略的程度。而采用基准像素和靶标相移的方法则完全消除了这一误差源,使得测试的精度得以提升,尤其在低对比度的条件下,精度的提升尤其显著。

3 试验验证和应用案例

3.1 试验验证

某线阵推扫红外相机的工作波段为8~10.5 μm,光学口径为Φ600 mm,像元角分辨率为25 μrad,系统焦距1 120 mm,探测器像元尺寸28 μm,设计光学系统传函0.48(Nyquist频率17.86 lp/mm处),理论设计系统静态调制传函在0.18(含装调误差、探测器传函)。测试系统采用口径Φ1 m焦距10 m的牛顿式平行光管,狭缝的宽度为250 μm,靶标的照明采用面源黑体,采用电机驱动靶标来回移动作反复测试。相机在穿轨方向典型视场静态传函测试的结果在0.17~0.20,与设计预期相符,也和实际成像的像质情况相符。相机在装调和检验测试中均采用了此方法。



(a)测试得到的MTF原始波形 (b)测试系统靶标组件示意图

图10 测试试验的结果和测试系统

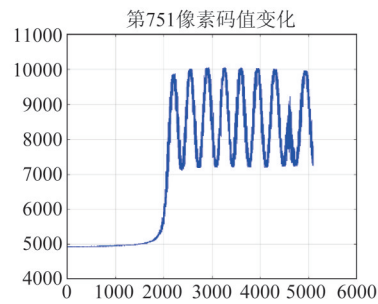
Fig. 10 measurement result and measurement system

做为试验的比对,在该相机完成辐射校正后,在真空试验中采用静态靶标的方法测试系统传函,得到的结果也分布在0.17~0.20,与采用移动靶标的方法结果一致,说明本文提出的基于基准像素和靶标相移的红外相机实验室传函测试方法是有效的,而且更实用、方便,适应性更强。

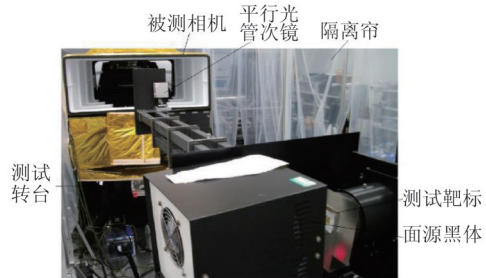
3.2 应用案例

上述红外系统的静态传函测试方法在多个红外系统型号项目中得到应用,波段包括中波红外和长波红外,测试场景包括系统装调阶段、系统真空热光学试验阶段和系统测试验收阶段。

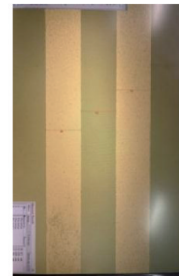
项目组在一台焦距1.6 m的大视场中波红外推扫相机穿轨方向的静态传函测试采用了此种方法,光管焦距20 m,靶标狭缝宽度的缝宽为0.175 mm,与探测器尺寸14 μm×14 μm,相机设计焦距1.592 m匹配,对应的测试空间频率为35.7 l/mm,全视场测试结果在0.2~0.25之间。



(a)测试得到的MTF原始图



(b)测试系统和被测系统局部照片



(c)测试靶标照片

图11 案例2的测试结果、测试系统和狭缝靶标

Fig. 11 Measurement result, measurement system and slit of case 2

另外,项目组利用相同的测试方法测试了口径在几十毫米的面阵凝视红外相机的两维静态调制传递函数,结果也比较符合预期。

多种条件下的应用结果显示,对采用焦平面探测器的红外成像系统建立的成像模型准确,基于此提出的相机传函测试方法也是有效的,而且适应性强,特别适合在相机调试过程中的测试。

4 结论

采用焦平面探测器的红外成像系统由于背景辐射和探测器较大的非均匀性,其成像模型和系统传函测试方法有其特殊性。论文通过对系统成像模型的建立和分析,指出只有在系统作良好的辐射校正后,才符合线性和空间不变性条件,可以采用传函来表征系统几何成像性能。在此基础上,提出了适用于采用焦平面探测器的红外成像系统的测试方法,解决了背景辐射的处理,而且使得测试不依赖于相机的辐射校正。试验验证的结果表明,研究提出基于基准像素和靶标相移的红外相机实验室传函测试方法是合理和有效的。

References

- [1] GUAN Ming-Zhen, ZHANG Xiao-Hui, ZHANG Ning. MTF measurement of CCD digital camera based on improved slanted-edge method[J]. *Journal of Applied Optics* (官明朕, 张晓辉, 张宁. 基于改进倾斜刃边法的 CCD 相机调制传递函数的测量. *应用光学*), 2016, **37**(1): 100-104.
- [2] Guan Mingzhen. Study on MTF measurement of CCD camera[D]. Changchun, Jilin: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (官明朕. CCD 相机成像系统调制传递函数测量方法的研究. 吉林省长春市: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所)), 2015.
- [3] GUO Yue. Study on the communication test method of TDICCD cameras[C]. Proceedings of the 19th Academic Conference of the Space Exploration Professional Committee of the Chinese Society for Space Science (1) (郭悦. TDICCD 相机的传函测试方法研究[C]//中国空间科学学会空间探测专业委员会第十九次学术会议论文集(上册)), 2006:360-365.
- [4] LI Xian-Sheng, LIU Hong-Xing, SUN Jing-Xu, et al. Measurement method of on-orbit modulation transfer function without atmospheric effect[J]. *Acta Optica Sinica* (李宪圣, 刘洪兴, 孙景旭, 等. 不含大气的在轨传递函数测试方法. *光学学报*), 2016, **36**(7):123-130.
- [5] XU Wei-Wei, ZHANG Li-Ming, YANG Bao-Yun, et al. On-orbit modulation transfer function estimation of optical satellite camera[J]. *Acta Optica Sinica November* (徐伟伟, 张黎明, 杨宝云, 等. 光学卫星相机在轨调制传递函数检测方法. *光学学报*), 2020, **40**(22):194-200.
- [6] YU Xun, SONG Wuhan, WANG Ying, et al. Dynamic MTF measurement method of electro-optical systems[J]. *Journal of Applied Optics* (于洵, 宋无汗, 王英, 等. 一种光电系统动态调制传递函数测量方法的研究. *应用光学*), 2013, **34**(6):928-932.
- [7] JIANG Chang-Lu, YUAN Liang, WANG Jian-Gang, et al. Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system[J]. *Journal of Applied Optics* (姜昌录, 袁良, 汪建刚, 等. 光电成像系统动态调制传递函数测量装置. *应用光学*), 2021, **42**(4): 592-596.
- [8] WANG Heng-Fei, LIU Tao, YING Cheng-Ping, et al. The application of dynamic focus technic in modulation transfer function measurement of charge-coupled devices [C]. Proceedings of the 2010 Optical Conference of the Optical Society of China (王恒飞, 刘涛, 应承平, 等. 动态定焦技术在 CCD 器件调制传递函数测量中的应用[C]//中国光学学会 2010 年光学大会论文集), 2010:500-505.
- [9] CHEN Yi-Ming. Measurement and optimization method of modulation transfer function of electron multiplication CCD imaging system. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University of Science & Technology (陈一鸣. 电子倍增 CCD 成像系统调制传递函数测量及优化方法[D]. 江苏省南京市: 南京理工大学), 2018.
- [10] Nakamura A, Tanizaki Y, Takeuchi M. Impact of point spread function correction in standardized uptake value quantitation for positron emission tomography images: a study based on phantom experiments and clinical images [J]. *Nihon Hōshasen Gijutsu Gakkai Zasshi*, 2014, **70**(6):542.
- [11] Munk O L, Tolbod L P, Hansen S B. Point-spread function reconstructed PET images of sub-centimeter lesions are not quantitative[J]. *Ejnmri Physics*, 2017, **4**(1):5.
- [12] Parravicini J, Tartara L, Hasani E. Fast calculation of the line-spread-function by transversal directions decoupling[J]. *Journal of Optics*, 2016, **18**(7):075609.
- [13] Estribeau M, Magnan P. Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12333 slanted-edge methodology [J]. *Proc. of SPIE*, 2004, **5251**:243-252.
- [14] WANG Chong-Ru, YANG Li-Feng, CAO Xun, et al. Recent Progress of Airborne infrared remote sensing technology in SITP[J]. *Infrared Millim. Waves* (王崇儒, 杨利峰, 曹汛, 等. 航空红外光电遥感技术最新进展. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(1):110-121.
- [15] HE Li, YANG Ding-Jiang, NI Guo-Qiang, et al. *Introduction to Cash Focal Plane Technology* [M]. Shanghai: National Defense Industry Press (何力, 杨定江, 倪国强, 等. *现金焦平面技术导论*. 上海市: 国防工业出版社), 2010.
- [16] Ziegler J, Eich D, Mahlein M. The development of 3rd gen IR detectors at AIM[J]. *Proc. Of SPIE*, 2011, **8012**(2):150-154.
- [17] FAN Wen-Long, DONG Feng, FU Yu-Tian. Information acquisition and pre-processing circuit design of infrared focal plane detector[J]. *Journal of Remote Sensing* (范文龙, 董峰, 傅雨田. 红外焦平面探测器信息获取与预处理电路设计. *遥感学报*), 2014, **18**(S1):0-34.
- [18] Zhang Tong, Study on modulation transfer function characterization methods of HgCdTe infrared focal plane [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Science

- (Shanghai Institute of Technical Physics))(张瞳。碲镉汞红外焦平面调制传递函数表征方法研究[D]。上海市:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2018.
- [19] ZHANG Tong, LIN Chun, CHEN Hong, *et al.* Influence of metal frame structure on modulation transfer function of HgCdTe infrared focal plane [J]. *Acta Optica Sinica* (张瞳, 林春, 陈洪雷, 等。金属框结构对碲镉汞红外焦平面调制传递函数的影响。《光学学报》), 2018, **38**(5): 25-29.
- [20] WANG Jing-Hui. Research on infrared focal plane detector's MTF, crosstalk testing technology [D]. Chengdu, Sichuan: (University of Electronic Science and Technology of China(王敬辉。红外焦平面探测器MTF、串音测试技术研究[D]。四川省成都市:电子科技大学), 2021.
- [21] ZHONG Li, SU Xiao-Feng, HU Wei-Da, *et al.* The simulation of intra-pixel sensitivity for HgCdTe infrared focal plane array [J]. *Infrared Millim. Waves* (钟篱, 苏晓锋, 胡伟达, 等。HgCdTe红外焦平面阵列像素内灵敏度函数仿真。《红外与毫米波学报》), 2021, **40**(5): 673-679.
- [22] Schuster J. Numerical simulation of the modulation transfer function (MTF) in infrared focal plane arrays: simulation methodology and MTF optimization [J]. *Physics & Simulation of Optoelectronic Devices*, 2018:53.
- [23] Cheng-ping Ying, Bin Wu, Heng-fei Wang, *et al.* MTF measurement of IRFPA based on double-knife edge scanning method [J]. *Proc. of SPIE*, 8907: 890746-1~890746-7.
- [24] Niemi S M, Cropper M, Szafraniec M, *et al.* Measuring a charge-coupled device point spread function [J]. *Experimental Astronomy*, 2015, **39**(2): 1-25.
- [25] Wu B, Shi X. MTF measurement of IRFPA based on double-knife edge scanning method [C]. *Proc. of SPIE*, 2013, **8907**(2): 890746.
- [26] Bu F, Qiu Y, Yan X. Improvement of MTF measurement and analysis using knife-edge method [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2013, **9**(3): 987-994.
- [27] Li H, Yan C, Shao J. Measurement of the modulation transfer function of infrared imaging system by modified slant edge method [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2016, **20**(3): 381-388.
- [28] CHEN Yong-Nian, CHEN Hong-Da, FU Yu-Tian. Study on background of space infrared optical system caused by self-emission [J]. *Journal of Remote Sensing* (陈永和, 陈洪达, 傅雨田。红外传感器自身引起的背景辐射研究。《遥感学报》), 2014, **18**(S1): 0-29.
- [29] Liang Quanting. *Physical Optics (Fifth Edition)* [M]. Publish House of Electronics Industry (梁荃廷。《物理光学(第五版)》。电子工业出版社), 2021: 64.
- [30] JIANG Jian-Guo, CAO Jian-Zhong, GAO Yu-Ming. *Fundamentals of signal and system analysis* [M]. Tsinghua University Press (姜建国, 曹建中, 高玉明。《信号与系统分析基础》。清华大学出版社), 1997: 47.
- [31] HUANG Xiao-Xian, FU Yu-Tian. Calibration for the thermal band of hyperspectral imager in Tiangong-1 [J]. *Journal of Remote Sensing* (黄小仙, 傅雨田。天宫一号超光谱仪红外谱段的实验室定标。《遥感学报》), 2014, **18**(S1): 0-41.