

文章编号: 1005-5630(2022)03-0014-09

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.03.003

低轨 TDICCD 相机像质地面模拟测试技术研究

成俊舟^{1,2}, 胡明鹏¹, 王玉龙^{1,2}, 杨文博^{1,2}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了对特定微结构时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)相机进行装调及性能测试, 提出并搭建了一套动态调制传递函数(MTF)地面模拟测试装置。在实现TDICCD相机成像的基础上, 利用刃边法对相机的MTF进行测量。经理论分析及实验验证, 该装置测量精度优于5%, 满足设计要求。并利用该装置分析了速高比 v/h 、偏流角 θ 这两个因素对TDICCD相机像质的影响, 其结果与理论相符。所提出的装置满足TDICCD相机地面动态MTF测试技术需求, 具有一定工程意义。

关键词: TDICCD; 动态调制传递函数; 测试装置; 成像质量; 刃边法
中图分类号: TN 206 **文献标志码:** A

Research on ground simulation testing technology of low orbit TDICCD camera image quality

CHENG Junzhou^{1,2}, HU Mingpeng¹, WANG Yulong^{1,2}, YANG Wenbo^{1,2}

(1. Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to assemble and test a microstructure TDICCD camera, a dynamic MTF test device was proposed and built. The MTF of the camera is measured by the edge method. After theoretical analysis and experimental verification, the measurement accuracy of the device is better than 5%, which meets the design requirements. The device is used to analyze the influence of the two factors of speed-to-height ratio and drift angle on the image quality of TDICCD camera, and the results are consistent with the theory. The construction of this device satisfies the requirements of the ground dynamic MTF test of the TDICCD camera, and has certain engineering significance.

Keywords: TDICCD; dynamic modulation transfer function; test device; imaging quality; edge method

收稿日期: 2022-01-07

基金项目: 国家重点研发计划专项(2016YFB0500200)

作者简介: 成俊舟(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光学系统像质测试与评价。

E-mail: chengjunzhou19@mailsucas.ac.cn

通信作者: 胡明鹏(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为光学系统像质测试与评价、辐射定标、相机测试与评价。E-mail: hmp@ioe.ac.cn

引言

近年来, 遥感技术作为一种重要的地球观测手段, 在各个领域愈发起着重要的作用。为了保证特定遥感器在轨工作性能与预期指标相符, 需要对其进行充分的地面测试。为此, 需要一套时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)相机地面模拟测试设备。

长春光机所的何煦等^[1-2]研制了一套调制传递函数(MTF)测试系统, 能够对成像系统的动、静态的传递函数进行测量, 其使用的测量方法是鉴别率法, 虽然这种方法较为简单、容易实现, 但一次只能测量有限点处的MTF, 而且需要根据不同的被测系统更换靶标; 北京空间机电所的杨沐等^[3]搭建了一套面向动中成像工作模式的地面成像试验系统, 研究了光强、积分级次等因素对MTF的影响, 但该系统没有实现偏流角模拟的功能, 且靶标同样是鉴别率靶, 具有一定的局限性; 西安应用光学研究所的姜昌录等^[4]研制了一套光电成像系统动态传递函数测量装置, 动态MTF测量范围为0.10~0.99, 测量不确定度为 $U=0.05(k=2)$, 但是, 在这套系统中没有增加对偏流角的模拟功能。

针对以上不足, 本文提出了一种用于空间TDICCD相机地面模拟测试的装置, 可以对相机在轨时的速高比 v/h 、偏流角 θ 这两个主要像质影响因素进行模拟。装置采用刃边法进行MTF测量, 能够快速、便捷的对系统性能进行评估。理论分析证明其测量精度优于5%, 实验验证了其可行性, 满足项目需求。

1 理论基础

1.1 TDICCD 成像原理

TDICCD 成像原理是在相机运动过程中, 不同的积分级次分别对同一景物进行成像, 最后将各级次的结果累加起来并输出。这种方式相当于增加了积分时间, 从而提高了成像质量^[5]。从该原理可知, 需要不同级次所拍摄的景物保持一致才能保证输出图像的质量。诸如振动、姿态变化

等因素都会对这种相机的像质造成影响。本文针对速高比 v/h 和偏流角 θ (见图1)这两个主要因素对像质造成的影响进行了分析。

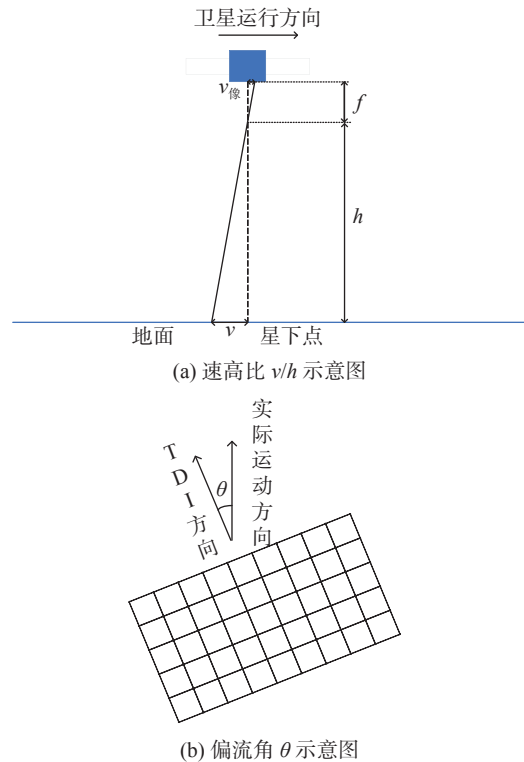


图1 速高比(v/h)及偏流角(θ)示意图

Fig. 1 Schematic diagram of velocity height ratio (v/h) and deflection angle (θ)

1.2 刃边法测量原理

MTF是当前最常用、最核心的相机性能指标。成像系统可以被看作是一个空间低通滤波器, MTF则表征了该滤波器对不同空间频率的衰减程度, 如图2所示。

刃边法是一种常用的MTF测量方法, 如

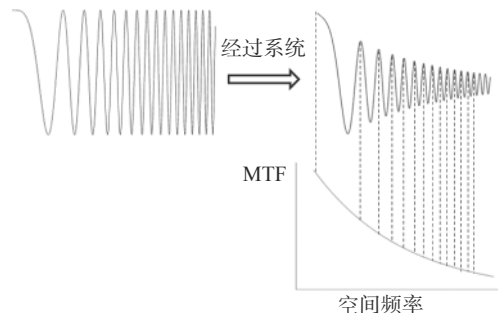


图2 MTF 表征系统对不同频率的衰减作用

Fig. 2 MTF characterizes the attenuation effect of the system on different frequencies

图 3 所示。该方法测量条件简单、能够较为完整地获得系统的 MTF 曲线，对噪声有一定的容忍度，其关键在于垂直于刃边方向的灰度变化情况的提取。



图 3 刃边法计算过程

Fig. 3 Calculation process of edge method

2 装置的系统组成及工作原理

所提出装置的测试系统针对一个 TDICCD 相机展开设计。整个系统由目标生成装置、运动装置及平行光管组成。设备工作在可见光波段，要求相机工作积分级次为 32 级时，测试系统在奈奎斯特频率 f_N 处测量精度达到 ± 0.05 。整个系统的结构如图 4 所示。

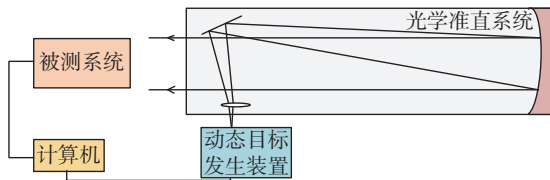


图 4 系统组成

Fig. 4 System composition

在测试时，将被测系统置于光管前的合适位置，根据需要设置动态目标发生器的运动状态。运动的靶标经过准直系统后由被测系统成像，对成像结果进行分析，从而实现对相机性能的评估。整套系统处于大理石平台上，以减少外界对测试结果的影响。

多个光学子系统的整体传递函数满足相乘

律原则^[2]，整个系统的 MTF 可以表示为各部分 MTF 的乘积：

$$MTF_{\text{测量}} = MTF_{\text{照明}} \times MTF_{\text{靶标}} \times MTF_{\text{调整台}} \times MTF_{\text{平行光管}} \times MTF_{\text{被测系统}} \quad (1)$$

由式(1)可见，任意一个环节均会对设备的 MTF 测量造成影响，而各个部分的影响都不可能从原理上进行消除，因此需要严格控制各个部分 MTF 对系统测试的贡献。为了达到精度要求，需要将总的测量精度分解到各个部分。

2.1 目标生成装置

照明系统同靶标一起构成目标生成装置，其作用是提供一个理想的目标。照明系统是用来对靶标进行均匀、明亮照明的装置，它的照明均匀性会直接影响系统 MTF 的测量。综合考虑常用的照明方式之后，本文选择了双排复眼照明系统^[6]，该方法是目前最有效的匀光手段，通常可以实现很高的照明均匀性^[7]。

照明系统的结构如图 5 所示。采用 Tracepro 软件的 10000 万条光线仿真结果如图 6 所示。照明均匀度公式为：

$$I_{\text{unif}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \quad (2)$$

式中： I_{unif} 为照明不均匀度； I_{max} 、 I_{min} 分别为最大光强与最小光强。由式(2)可得，在靶标尺寸范围内，其照明均匀性能达到 99%。实测其均匀性为 98% 左右，在奈奎斯特频率 f_N 处造成的传递函数约为 0.98。

靶标是被测光学系统成像的目标。根据所采用的测量方法不同，靶标的图案也不同。本文主要使用刃边靶进行测试。刃边靶标如图 7 所示，这种靶标制作简单、使用方便。为了提高测量精度，在测量时通常采用倾斜刃边法的方法^[8-12]。

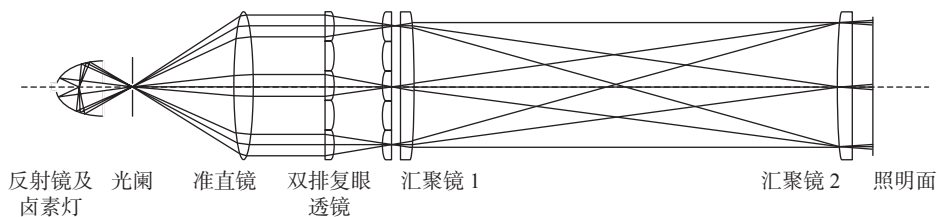


图 5 照明系统光学组成

Fig. 5 Optical composition of illumination system

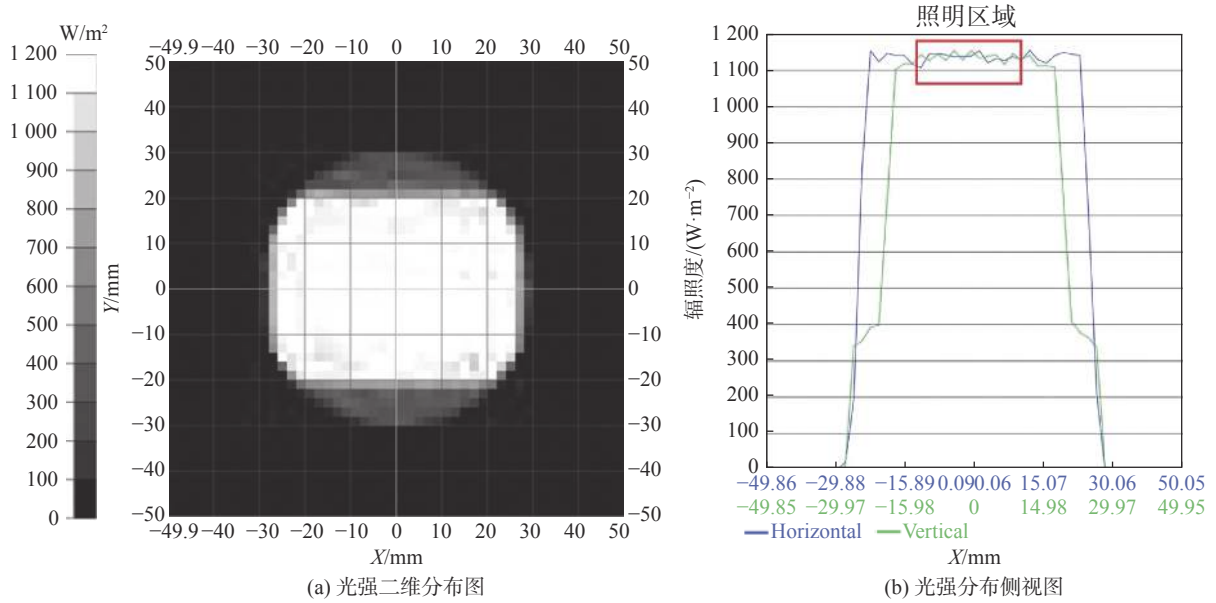


图 6 照明系统仿真结果

Fig. 6 Illumination system simulation results



图 7 刃边靶标图示

Fig. 7 Illustration of edge target

由于靶标的加工工艺成熟, 且所需的图案简单, 故可忽略靶标对测量结果的影响。

2.2 四维运动平台

为了实现 TDICCD 的成像及目标生成装置与准直系统光轴的对准, 本文设计了一个四维运动平台, 其结构如图 8 所示。

在图 8 中, 位移台 1 是一个水平位移台, 靶标固定在这个平台上。位移台 1 可以在垂直于光轴方向的水平面内匀速运动, 实现被摄目标与相

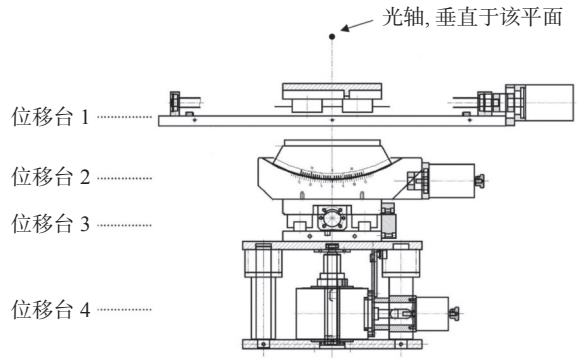


图 8 四维运动平台正视图

Fig. 8 Front view of four-dimensional motion platform

机之间的相对运动。相机像面处 TDICCD 的扫描速度在某行频下为 v_2 , 公式为:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3)$$

式中: f_1 、 f_2 分别为平行光管和被测系统的焦距; v_1 、 v_2 分别为平行光管焦平面处的速度与对应 TDICCD 的扫描速度。根据式(3), 结合实际情况, 可以选定位移台所需要的运行速度。

在 TDI 方向, 速度不匹配所造成的 MTF 可以由下式计算^[13-15]:

$$MTF_x(f) = \frac{\sin\left(\pi f m a \frac{\Delta v}{v}\right)}{\pi f m a \frac{\Delta v}{v}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{2 f_N} m \frac{\Delta v}{v}\right)}{\frac{\pi f}{2 f_N} m \frac{\Delta v}{v}} \quad (4)$$

式中： f 为空间频率； m 为TDI级次； a 为CCD像素尺寸； v 为电荷转移速度； Δv 为电荷转移速度和焦面上图像移动速度的差值。对式(4)进行理论仿真得到图9。

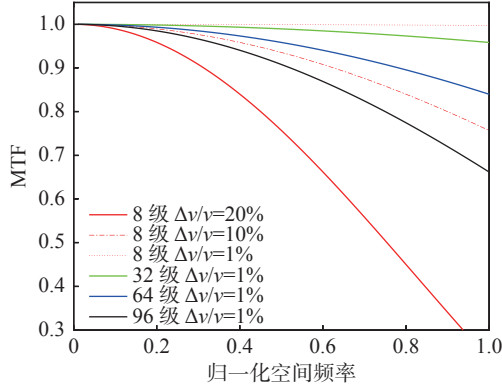


图 9 不同级数、速度失配时引起的 TDI 方向的 MTF
Fig. 9 MTF in TDI direction caused by different stages and speed mismatch

位移台 2 用于实现偏流角的产生，均匀光源被固定在位移台 2 上。位移台 2 可以围绕着平行光管的光轴所在直线旋转，其作用是实现实际成像过程中偏流角的模拟。卫星在特定轨道飞行时，偏流的变化范围大概在在 $\pm 3^\circ$ ，同时考虑到未来增加其适用范围，将转台角度的变化范围选择为 $\pm 14^\circ$ 。

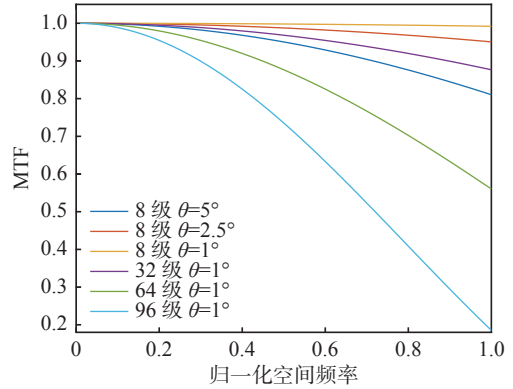
偏流角在垂直于 TDI 方向上造成的 MTF 可表示为^[13, 16]：

$$MTF_{yaw_y}(f) = \frac{\sin(\pi f m a \tan(\theta))}{\pi f m a \tan(\theta)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{2 f_N} m \tan(\theta)\right)}{\frac{\pi f}{2 f_N} m \tan(\theta)} \quad (5)$$

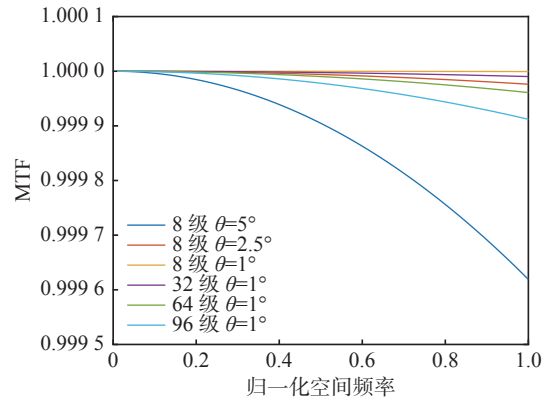
偏流角在 TDI 方向上造成的 MTF 可被表示为：

$$MTF_{yaw_x}(f) = \frac{\sin(\pi f m a (1 - \cos(\theta)))}{\pi f m a (1 - \cos(\theta))} = \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{2 f_N} m (1 - \cos(\theta))\right)}{\frac{\pi f}{2 f_N} m (1 - \cos(\theta))} \quad (6)$$

图 10 为根据式(5)、(6)所得的仿真结果。由图 10 可见，偏流角 θ 主要影响的是垂直 TDI 方向上的 MTF，在 TDI 方向上虽然也有影响，但一般可以忽略。



(a) 对垂直 TDI 方向的影响



(b) 对 TDI 方向的影响

图 10 不同积分级次、不同偏流角对 TDI 方向及垂直 TDI 方向 MTF 的影响

Fig. 10 Effects of different integration levels and different bias angles on MTF in TDI direction and vertical TDI direction

位移台 3 可以沿着光轴方向运动，从而将靶标移动到平行光管的焦面位置。在实际场景中，只需要移动到允许的焦深范围 ΔZ 内即可，焦深范围 ΔZ 可被表示为：

$$\Delta Z = \pm \frac{\lambda}{2(u^2)} \quad (7)$$

式中 u 为光管的数值孔径。根据式(7)可以计算出平行光管的焦深范围 ΔZ ，从而选择位移台 3 的精度。

位移台 4 是一个升降台，可以实现靶标上下位置的调整，并且需要在相机装调时对靶标的条纹与 TDICCD 进行像素级对准，可表示为：

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{d_1}{d_2} \quad (8)$$

式中： f_1 、 f_2 分别为平行光管和被测系统的焦距； d_1 、 d_2 分别为平行光管焦平面处的物理尺寸与对应的被测系统像面处的物理尺寸。结合

CCD 像素尺寸信息, 可以得到 CCD 投影在靶面上的尺寸, 根据该尺寸可进行位移台 4 精度的选取。

根据以上分析、测量精度要求及现有条件, 对各位移台的精度选择如表 1 所示。

表 1 四维位移台的参数选择

Tab. 1 Parameter selection of 4D translation stage

位移台	位移台1	位移台2	位移台3	位移台4
运动形式	水平直线方向	摇摆台	水平直线方向	垂直升降
行程	400/mm	$\pm 14/(\circ)$	100/mm	100/mm
精度要求	速度精度优于0.5%, 最大速度不小于 $55(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ 分辨率优于 $0.001/(\circ)$ 重复定位精度优于 $5\mu\text{m}$ 重复定位精度优于 $5\mu\text{m}$			

2.3 光学准直系统

光学准直系统是用来产生无穷远目标的设备。为了测量的准确性, 平行光管的焦距至少应

为被测系统的 2~5 倍^[17]。考虑到被测系统的焦距, 本文选择了一个焦距值为 7500 mm, 口径为 400 mm 的离轴抛物平行光管, 其结构如图 11 所示。

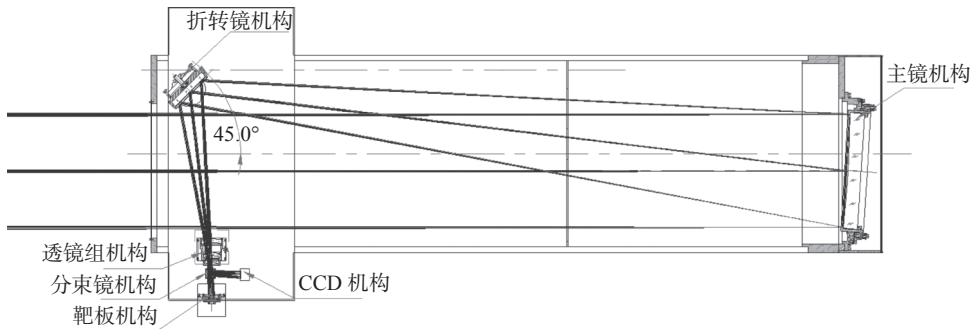


图 11 平行光管结构

Fig. 11 Structure of collimator

图 12 为实测的平行光管在的轴上及轴外波前图像, 其 RMS 小于 $\lambda/14$ 。

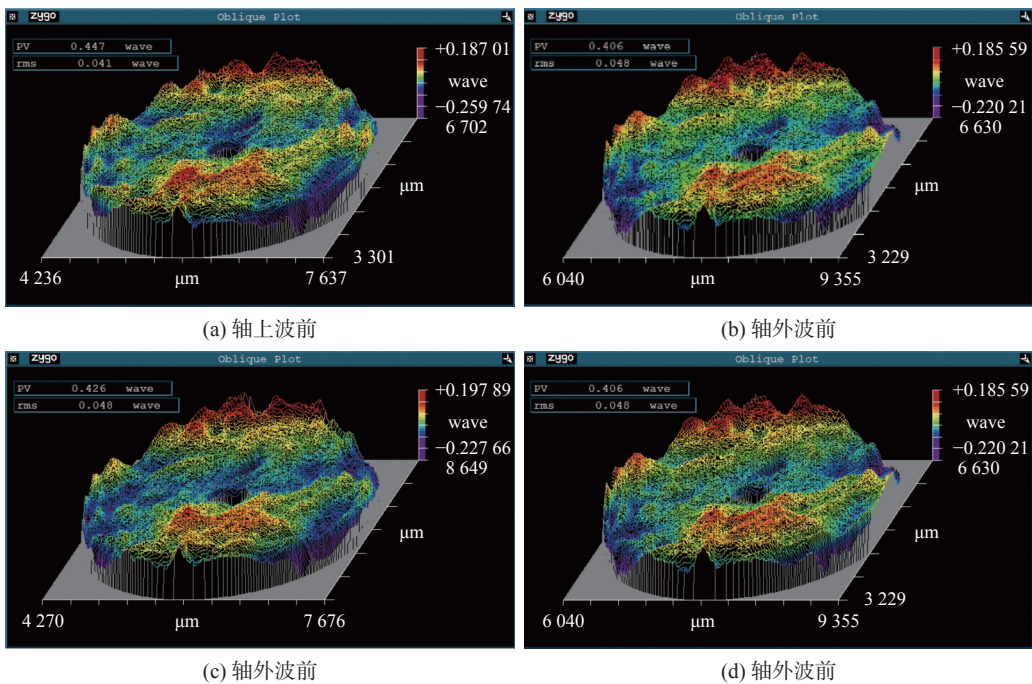


图 12 平行光管波前测试结果(轴上、轴外)

Fig. 12 Wavefront test results of collimator tube (on-axis, off-axis)

图 13 为平行光管实际轴上 MTF 与理论 MTF。可以看到，该平行光管的 MTF 曲线已经接近衍射极限，修正后在系统奈奎斯特频率 f_N 处对测试结果的 MTF 影响大概在 0.98 左右。

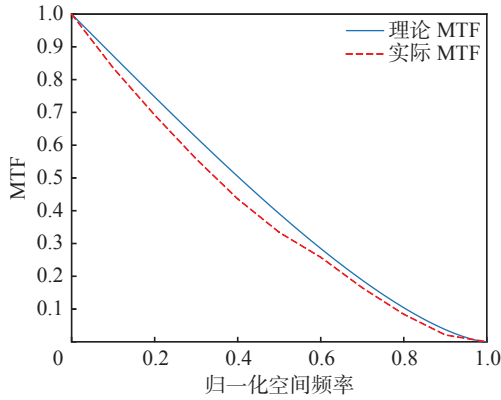


图 13 平行光管实测 MTF 与理论 MTF

Fig. 13 Measured MTF and theoretical MTF of collimator

2.4 精度分析

对以上各部分的影响做一个总结，如表 2 所示。

表 2 TDI 级数为 32 时系统各部分在奈奎斯特频率 f_N 处对结果的影响

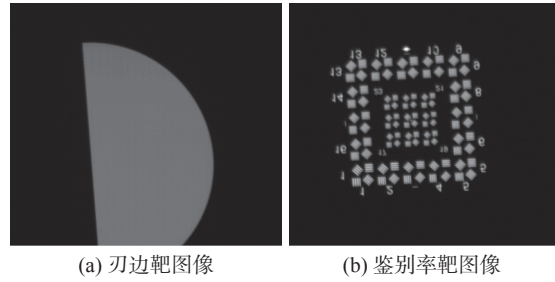
Tab. 2 The influence of each part of the system over the result at the Nyquist frequency when the TDI level is 32

影响源	均匀光源	靶标	四维调整台	光学准直系统	总影响
MTF Nyquist	0.98	忽略不计	TDI方向: 0.99	0.98	0.95
			TDI垂直: 1		0.96

可见其在奈奎斯特频率 f_N 处的影响在 0.95 左右，精度满足了设计要求。

3 实验结果及分析

在实验测量过程中，首先将被测相机放置在平行光管前的合适位置，调节四维调整台使得靶标处于恰当的位置。调节位移台 1 速度使之与 TDI 速度相匹配，使用被测系统进行图像采集。受限于测试条件，本次实验主要在行频为 1000 Hz、积分级次为 8 级时进行，采集到的图像如图 14 所示。



(a) 刃边靶图像 (b) 鉴别率靶图像

图 14 TDI CCD 采集到的速度匹配图像

Fig. 14 The image collected by TDI CCD

对刃边图样进行 MTF 计算，在其奈奎斯特频率 f_N 范围内得到的曲线如图 15 所示。

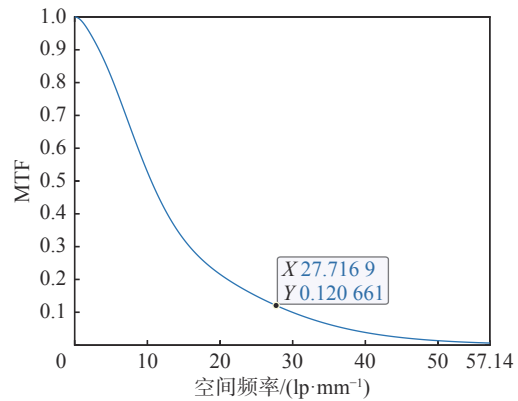


图 15 刃边法测得 TDI 方向的 MTF

Fig. 15 The MTF in the TDI direction measured by the edge method

在 $f_N/2$ 处附近选择一空间频率 f 为 27.71 lp/mm，刃边法测得结果为 0.121，鉴别率靶测得的结果为 0.143，两者相差较小，可以认为两种方法测量结果一致。

图 16 是 TDI 级次为 8 级时、速度失配分别为 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 时所获得的图像。

此时由于实际的采样间隔的变化，获得的图像相对于速度匹配图像存在明显的几何畸变，在计算 MTF 时要加以修正。计算所得的 MTF 曲线如图 17 所示。

不同情况下 8 级 TDI 时在空间频率 f 为 27.71 lp/mm 处的 MTF 值以及由速度失配引起的 MTF 及其理论值如以表 3 所示，可见其实测值与理论值相符。

图 18 显示了无偏流角 θ 时与存在偏流角 θ 时 TDI 方向上的 MTF，两者保持一致，与之前的理论分析结果一致。偏流角 θ 对 TDI 方向

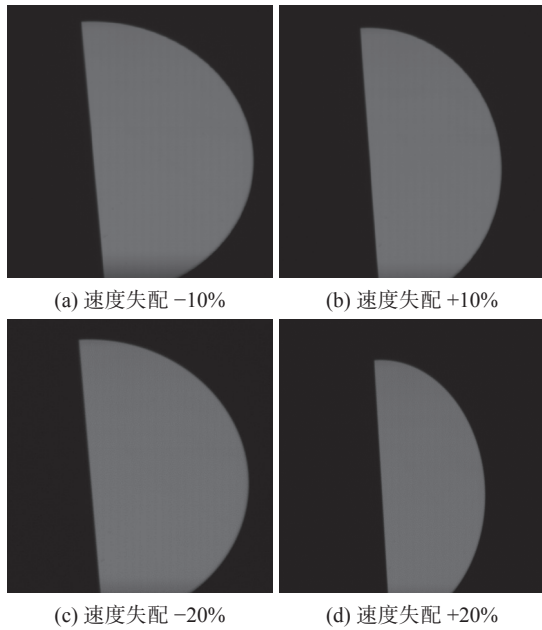


图 16 速度失配±10% 和±20%

Fig. 16 Speed mismatch ±10% and ±20%

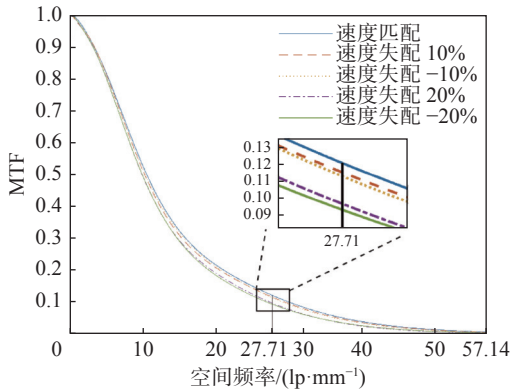
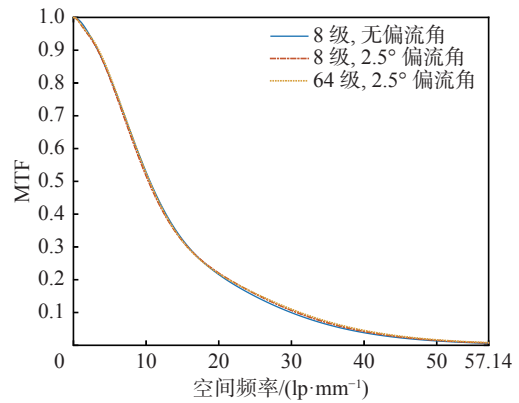


图 17 速度失配对 TDI 方向 MTF 的影响

Fig. 17 The effect of speed mismatch on MTF in the TDI direction

表 3 8 级 TDI 时速度失配引起的 MTF 与理论值的对比
Tab. 3 Comparison of MTF theoretical value and actual value caused by velocity mismatch at 8-level TDI

速度匹配时的 MTF	速度失配时 MTF	由速度失配引起的 MTF	速度失配理论 MTF
0.121	速度失配-10%	0.1129	0.9330
	速度失配10%	0.1152	0.9521
	速度失配-20%	0.0930	0.7703
	速度失配20%	0.0965	0.7994



(c) TDI 方向的 MTF

图 18 有无偏流角时获得的图像及 TDI 方向的 MTF

Fig. 18 The image obtained with or without drift angle and the MTF in the TDI direction

上的像质影响不大。

4 结 论

本文提出了一种对微结构 TDICCD 相机动态 MTF 地面模拟的测试装置, 针对 TDICCD 的成像特点, 设计了相应的结构, 实现了对相机在轨运行时速高比 v/h 及偏流角 θ 这两个主要因素的模拟。其中照明系统采用双排复眼的结构, 靶面处照明不均匀度优于 2%。四维位移台各方向均根据需求选定了对应的精度。平行光管轴上波前小于 $\lambda/14$, 接近衍射限。经过理论分析及试验验证, 其测试精度满足测试装调需求。本文只对速高比 v/h 、偏流角 θ 这两个因素进行了模拟, 下一步工作可以添加对震动、离焦、卫星姿态等其它因素的模拟。

参考文献:

[1] 何煦, 吴国栋. 推扫式光电成像系统调制传递函数测

- 试装置的设计 [J]. 应用光学, 2013, 34(1): 1 – 8.
- [2] 何煦, 陈琦. CCD 相机动态传递函数核心测试设备的设计 [J]. 光学技术, 2010, 36(3): 464 – 468.
- [3] 杨沐, 程少园, 崔程光, 等. 面向卫星动中成像模式的地面实验系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 0428002.
- [4] 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 [J]. 应用光学, 2021, 42(4): 592 – 596.
- [5] WONG H S, YAO Y L, SCHLIG E S. TDI charge-coupled devices: Design and applications[J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1992, 36(1): 83 – 106.
- [6] 沈默. LED 投影显示照明系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [7] 姜家华. 11nm 以下技术节点极紫外光刻照明系统设计研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- [8] 徐航, 李传荣, 李晓辉, 等. 一种优化的刃边法 MTF 在轨评估算法 [J]. *遥感信息*, 2012, 27(6): 10 – 16.
- [9] 聂荣娟, 刘丹丹, 张晓迪. 矩形靶标的倾斜刃边法提取 MTF[J]. 北京测绘, 2018, 32(11): 1285 – 1288.
- [10] 戴奇燕, 夏德深, 何红艳, 等. 刀刃法在轨 MTF 测量性能分析 [J]. *航天返回与遥感*, 2006, 27(3): 22 – 27.
- [11] 胡涛, 张冬冬. 高精度刃边法测量红外相机 MTF 的研究 [J]. *红外*, 2015, 36(7): 10 – 15.
- [12] 张牧欣. 基于 MTF 的 CCD 相机成像质量评价方法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- [13] DUBEY N, BANERJEE A. Dynamic MTF improvement scheme and its validation for CCD operating in TDI mode for earth imaging applications[C]//Proceedings Volume 9881, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization IV. New Delhi, India: SPIE, 2016.
- [14] 樊超, 李英才, 王锋, 等. 影响 TDICCD 相机成像质量的因素分析 [J]. *红外*, 2008, 29(8): 21 – 25,48.
- [15] 孙崇尚, 王琦, 丁亚林, 等. 基于倾斜刃边法航空相机像移的调制传递函数测量 [J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1212001.
- [16] 樊超, 李英才, 易红伟. 偏流角对 TDICCD 相机像质的影响分析 [J]. *光电工程*, 2007, 34(9): 70 – 73,107.
- [17] 李响. 空间光学遥感器检测中大口径平行光管应用技术研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2014.

(编辑: 钱紫衡)