

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003004

航空航天相机成像性能测试系统研究*

乔卫东 李 跃 郭 梁

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘 要:在航空航天相机的研制过程中,为了测试与评估其整机系统的成像性能,针对相机高分辨率、高量化位数和高帧频的特点,研究开发了一套基于千兆以太网的航空航天相机成像性能的测试系统。在测试系统中应用 FPGA 完成千兆以太网协议实现图像数据的高速传输,通过上位机实时显示图像并进行图像处理与计算,经过对调制传递函数的理论分析,确定采用对比度法计算获得相机的调制传递函数(MTF)。实验验证了图像数据实时显示的可行性与图像数据传输的正确性,同时使用 3 种不同型号的相机获取了不同分辨率 2 048×2 049、2 564×2 162、2 045×256 的测试图像的 MTF 值,通过获取 3 组数据的标准差,并与传统人工测试方法的对比分析,实验表明,该测试装置大幅提高了测试效率和测试精度,实现了整体系统成像性能的实时评价。

关键词: 航空航天相机;成像性能;千兆以太网;调制传递函数;对比度法

中图分类号: TN919.8;V19 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 535.1030

Development of device for imaging performance test of aerospace camera

Qiao Weidong Li Yue Guo Liang

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract:In the aerospace camera development process, in order to test and evaluate the imaging performance of its complete system, a set of test system for the imaging performance of aerospace cameras based on Gigabit Ethernet has been developed aiming at the characteristics of high resolution, high quantization digits and high frame rate. In the test system, FPGA is used to complete the Gigabit Ethernet protocol to achieve the high-speed transmission of image data, the image is displayed in real time by the host computer. Then image processing and calculation are performed, after theoretical analysis of the modulation transfer function, it is determined that the contrast method is used to calculate the modulation transfer function of the camera (MTF). The experiments have verified the feasibility of real-time display of image data and the correctness of image data transmission, at the same time, the MTF values of test images with different resolutions of 2 048×2 049, 2 564×2 162, and 2 045×256 were obtained by using three different models of cameras, the standard deviations of the three sets of data were obtained and compared with traditional manual test methods. The experiment shows that the test device greatly improves the test efficiency and test accuracy, it realizes the real-time evaluation of the overall system imaging performance.

Keywords: aerospace cameras; imaging performance; gigabit ethernet; modulation transfer function; contrast method

0 引 言

航空航天相机主要服务于目标探测、态势感知、对地观测等领域,在资源调查、防灾减灾、国防安全等方面发

挥着重要作用,其成像性能的优劣对观测效果和观测精度有着直接影响。作为空间光学遥感领域重要照相设备,航空航天相机搭载在各种类型的飞行器上,在地面遥控中心的控制下,实时对目标进行拍摄,由于受环境限制,相机成像质量大大降低,因此在其研制过程中需要保

证相机的图像质量^[1-4]。

常用像质评价方法中主要有阴影法、分辨率法和星点法等检测方法,这几种方法都容易受测量人员主观因素影响较大,对同一个系统进行测试可能得到完全不同的结果。因此,在不断地研究和发展中,调制传递函数(MTF)这一概念加入像质评价指标中,被认为是评估成像性能最有效、最准确的方法之一,反映了像调制与物目标调制之间对比的关系,其测试技术广泛用于镜头检测、图像处理和光学系统性能评价等^[5-7]。对比几种评价方法,利用 MTF 进行计算的测量方法从根本上进行了相应的补充和完善,改善了其他检测方法在评价像质上存在的主观影响,其测试结果更加精确、客观。

因此,为了在实验室状态下完成高数据率航空相机成像性能的快速测试,研制一套采用千兆以太网技术实时获取高速图像数据,并在计算机实时显示,通过 MTF 值的计算反映相机性能的装置,具有重要的实际应用价值。

1 测试系统计算原理及总体设计

1.1 测试系统 MTF 的计算原理

测试过程中将整个成像系统作为一个线性系统,采用输入信号与输出信号的灰度值进行比较的方法得到整机成像系统的 MTF。理论上在测试中输入目标应采用正弦靶标,但是在实际中正弦靶标工艺复杂,制作困难,并且无法确保精度,因此通常选择容易制作且精度较高的矩形靶标^[8]。靶标经被测系统成像后,通过测试系统的对比度获取系统的 MTF 值,则以矩形靶标为目标物的成像系统中 MTF 为^[9]:

$$MTF = \frac{\pi}{4} \times \frac{M'}{M} \quad (1)$$

式中: M' 、 M 分别表示输出图像的对比度和输入图像的对比度。

靶标图像的输入对比度为:

$$M' = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

式中: $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别表示条纹图像最大亮度和最小亮度。

被测系统中使用对比度法计算 MTF 时,靶标输入对比度 M 必须足够高,因此在系统中采用高对比度矩形靶标作为目标物,可将其输入对比度 M 近似看作为 1,则:

$$MTF = \frac{\pi}{4} \times M' = \frac{\pi}{4} \times \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3)$$

1.2 测试系统的总体设计

航空航天相机成像性能测试系统平台由高对比度黑白条纹靶标、平行光管、相机、靶标修正装置以及图像接

收及传输装置系统组成,如图 1 所示。将靶标固定在平行光管的焦平面处,利用平行光管为相机提供无穷远景物目标。相机放置在平面转台上,使平行光管与相机镜头的光轴同轴,同时在测试中必须确保 CCD 像元行垂直于目标条纹^[10]。测试中使用标准光源发出均匀光投射在靶标上,通过平行光管和相机镜头将其成像在相机器件上,经由 FPGA 利用千兆以太网实现自定义 UDP/IP 协议完成图像数据的接收与传输,由计算机经网口接收图像数据进行图像的显示以及 MTF 值的计算^[11]。

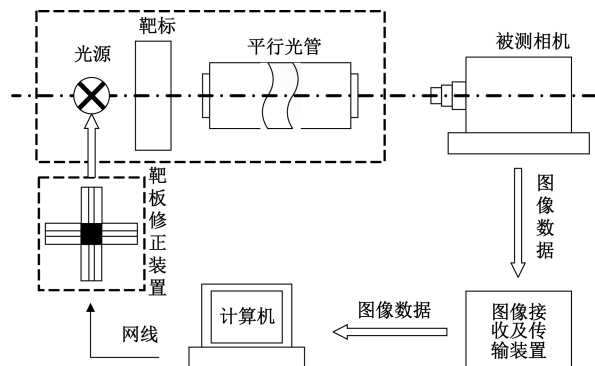


图 1 测试系统结构

Fig. 1 Test system structure diagram

2 图像接收及传输系统

针对相机图像高数据率传输的特点,为了确保数据能够快速准确传输,使用千兆以太网进行图像数据传输是最佳的传输方式,考虑到 FPGA 在逻辑资源和数据处理能力优势明显,因此选用 FPGA 作为系统主控制器,使用 Verilog HDL 硬件描述语言实现以太网协议。

2.1 千兆以太网传输系统设计

根据计算机网络基本模型,为了实现最基本的数据传输,需要完成传输层、数据链路层和物理层的设计。传输层采用 UDP 协议实现,数据链路层通过调用 FPGA 的 IP 核实现数据封装成帧,物理层 PHY 芯片采用了 Marvell 公司生产的 88E1111^[12]。其总体结构主要包括缓存 FIFO 模块、UDP/IP 模块、MAC IP 核模块和物理层 PHY 模块,如图 2 所示。

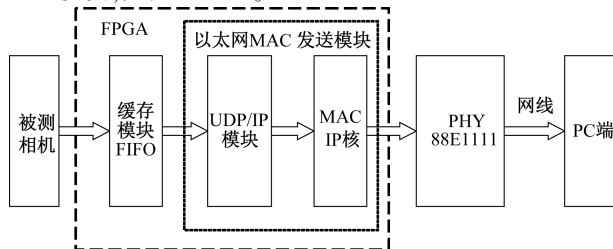


图 2 数据传输系统设计

Fig. 2 Data transmission system design

被测相机发送图像数据至 FPGA 的 FIFO 缓存模块。FIFO 模块主要对图像数据进行缓存,同时解决数据传输跨时钟的问题。UDP/IP 模块接收数据后将帧头逐层添加至数据完成封装,发送至 MAC 控制器。MAC 控制器调用 Xilinx 官方提供的 IP 核,设定速率为

1 000 Mbps,进一步为数据添加前导码、起始码以及 FSC 校验码,将数据封装成标准以太网数据帧的格式,如图 3 所示。通过 GMII 总线接口将数据送入物理层 PHY 芯片 88E1111,完成数据编码后经由 RJ45 网口发送给 PC 端。

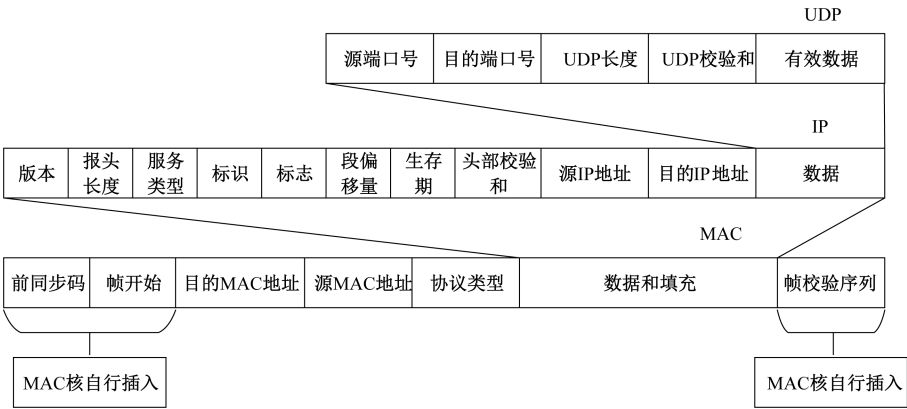


图 3 数据帧封装格式
Fig. 3 Data frame package format

2.2 FPGA 逻辑设计

在 FPGA 逻辑设计中,以太网协议的实现是系统的核心部分,本系统的数字逻辑部分主要介绍以太网数据发送的设计,即 UDP/IP 模块和 MAC IP 核模块,根据 UDP 数据报协议,在一系列工作后将数据传输给 PHY,生成模块端口如图 4 所示。信号 tx_clk_125 作为千兆数据发送时钟信号设定为 125 MHz,由 FPGA 内部锁相环倍频获得;rst_n 为复位信号;data_length[15:0] 为发送数据的有效长度;fifo_empty 为数据缓存模块为空的标志,表示不能继续读取数据;fifo_rd_data[7:0] 及 tx_start 分别为 FIFO 模块发送过来的图像数据和发送有效信号,fifo_rd_req 为发给 FIFO 模块读取数据请求信号;udp_tx_start 为数据发送开始信号;gmii_txd[7:0]、gmii_tx_en、gmii_tx_er 分别为发送到 PHY 的数据信号、有效信号、错误信号。

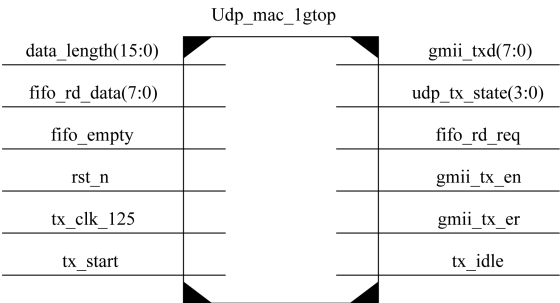


图 4 数据发送模块顶层端口
Fig. 4 Data sending module top port

MAC 层发送数据时采用以太网 UDP 数据报协议,首先将需要发送的数据与首部一起组成 UDP 数据报;接着,将 UDP 数据报作为 IP 数据部分与 IP 首部一起组成 IP 数据报;最后,将 IP 数据报作为 MAC 帧数据部分与 MAC 首部一起组成 MAC 帧。

该模块中的代码设计中关于数据包的封装过程是通过有限状态机实现的发送数据的流程如图 5 所示,系统在上电或复位时为初始状态 idle,对信号进行初始化;当信号 udp_tx_start 到来时,状态才会发生变化,转换至 ready 状态,将各层数据报报头写入寄存器中,并生成首部校验和;然后跳转到 send_head 状态,根据发送信号顺序发送 MAC 帧首部、IP 数据报和 UDP 数据报的首部;并跳到 send_data 状态,检测到 fifo_rd_req_en 信号时,发送 FIFO 模块传输的原始图像数据,发送完毕后返回到 idle 状态,并等待发送下一个 MAC 帧数据。

2.3 千兆以太网仿真测试

千兆以太网使用的仿真测试软件为 Modelism 软件,用于观察 FPGA 内部信号,仿真结果如图 6 所示。从图 6 可以看出数据传输是按照设定的通信协议进行传输,在真实数据前添加了帧首部、MAC 帧头、IP 报头、UDP 报头等进行传输,能够正确的将数据进行传输,保证图像数据的可靠性。

3 航天相机的 MTF 测试软件设计

3.1 MTF 测试系统架构

MTF 测试系统离不开软件系统的支持,软件部分使

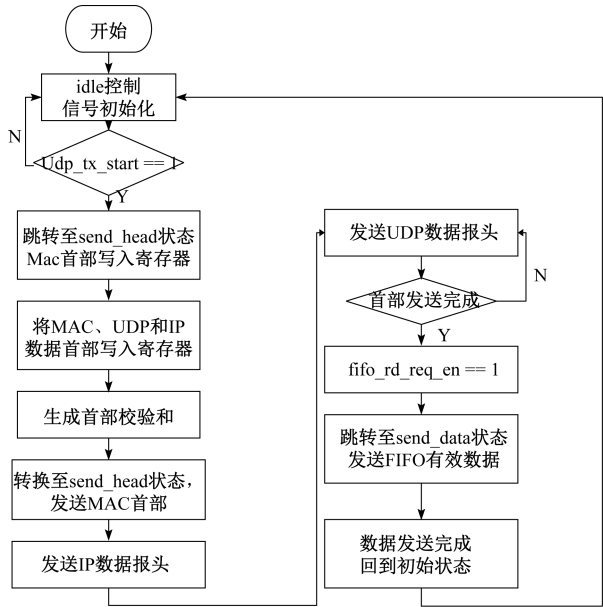


图 5 数据发送流程

Fig. 5 Data transmission flow chart

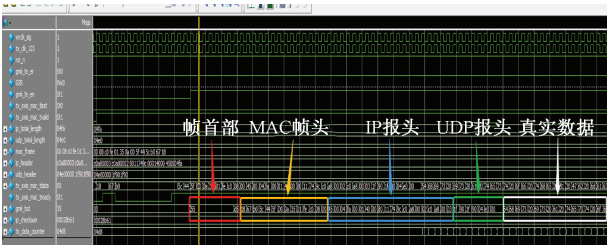


图 6 以太网数据传输仿真结果

Fig. 6 Ethernet data transmission simulation results

用 Visual Studio 2010 作用开发环境,以 C++语言进行编写^[13]。主要有 3 大模块,分别是图像采集显示模块、图像检测模块以及数据计算模块,如图 7 所示。图像采集显示模块建立与 FPGA 的通信,由此实现相机图像数据的采集与快速显示,同时为了保证靶标位置与相机 CCD 像元的垂直^[14],通过图像检测模块对靶标图像进行边缘检测和角度计算,最后获得垂直靶标图像对其进行受检区域的确定后计算 MTF 值,实现对被测系统传递函数的实时计算。

3.2 图像数据采集与显示

图像数据的采集与显示模块主要功能是通过建立与下位机 FPGA 的 UDP 通信,将采集的数据根据一定的图像格式提取有效图像数据将其显示并在计算机实时保存下来。在程序中调用 SOCKET 套接字^[15],在界面中输入本机、对方(FPGA) IP 地址以及本机、对方端口号,点击“进行连接”按钮建立 UDP 与 FPGA 通信。建立 UDP 通信如图 8 所示。

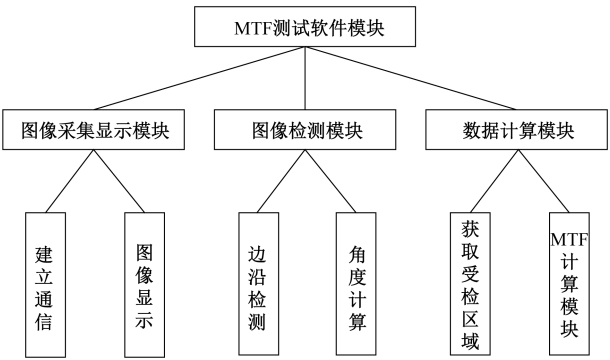


图 7 软件部分模块

Fig. 7 Software part block



图 8 建立 UDP 通信界面

Fig. 8 Establish UDP communication interface

由于相机图像在传输过程中是原始数据格式,即 RAW 格式,在计算机无法显示,因此需要转换为 BMP 格式进行图像的显示,同时可以将当前采集的图像将保存为 8 bit 的“bmp”格式。

3.3 图像检测

在拍摄靶标图像时,由于人工放置靶标,无法保证靶标与 CCD 像元垂直,因此需要对图像进行检测修正。通过 MATLAB 利用 Canny 边缘检测算子和 Hough 变换相结合的方法获取倾斜角度^[16],通过在 VS2010 中调用动态链接库获取结果。

Canny 边缘检测算法^[17]使用高斯滤波器,去除噪声使图像平滑,然后计算每个像素点的梯度强度和方向,为了消除边缘检测带来的杂散响应,应用非极大值抑制,同时在算法中应用双阈值检测来确定实际边缘和潜在边缘^[18],最后抑制弱边缘完成边缘检测。

Hough 变换原理是利用点与线的对偶性,从图像中识别几何形状,这里主要识别直线形状^[19]。利用 Canny 边缘检测提取图像的边缘线性信息,将边缘直线通过曲线表达形式变为参数空间的一个点。从点的位置可以确定图像直线的角度和距离。将角度信息转换成脉冲数利用步进电机驱动修正装置顺时针旋转实现靶标的修正^[20],获得垂直条纹图像,修正装置实物图如图 9 所示。

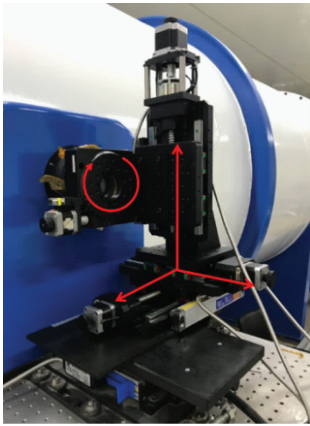


图 9 修正装置实物
Fig.9 Correct the physical of the device

3.4 MTF 值的计算

在计算机存储中,图像亮度由灰度值来体现,在本次的测试中,每个像元用 8 bit 存储,则黑白图像的灰度值范围为 0~255。因此,在计算中的某条纹的亮度对应的就是该条纹的灰度级数,可将条纹的灰度级进行 MTF 计算。软件流程如图 10 所示。

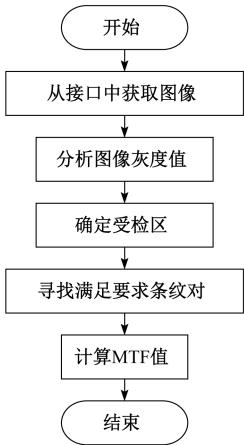


图 10 测试 MTF 的主要流程
Fig.10 The main process of testing MTF

图像的灰度值数据存储在 1 个矩阵中,每个像素对应 1 个点。对获取的黑白条纹图进行灰度值分析,获取灰度值曲线,如图 11 所示。观察灰度值数据,通过预先设定的灰度值阈值区目标区域和非目标区域。若该像素点 $G(x,y)$ (x 表示行, y 表示列) 的灰度值处于灰度值阈值之间,并且满足式(4)或(5),那么确定该点就是检测区域的点。

$$G(x,y) > G(x,y + 1) \text{ 且 } G(x,y) > G(x,y - 1) \tag{4}$$

$$G(x,y) < G(x,y + 1) \text{ 且 } G(x,y) < G(x,y - 1) \tag{5}$$

将首个满足条件的点作为检测区域的开始,向行尾 0 查找,直到出现非区域的像素点即不满足条件的点,将此作为检测区域的结束值,直到找到所有满足条件的点,得到首行的检测区域。同样的方法获得尾行的检测区域,得到整个图像的目标区域^[21]。受检区域的部分灰度值数据如图 12 所示。

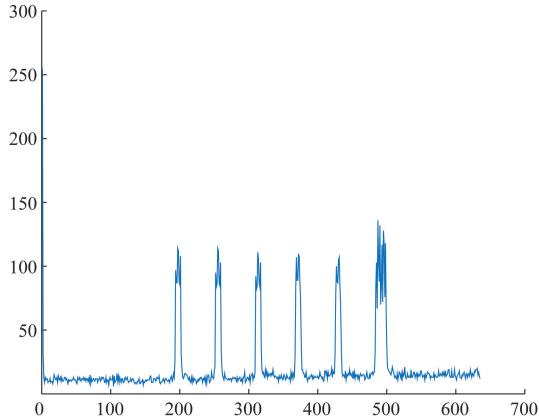


图 11 灰度值曲线
Fig.11 Grayscale value graph

124	53	158	87	160	50	112	51
130	50	160	88	160	53	110	56
131	59	165	90	168	58	118	57
135	57	162	83	159	55	117	55
128	50	155	80	153	49	113	50
132	56	159	80	158	56	118	56
134	52	163	83	163	55	116	51
138	54	154	86	162	53	120	52
128	59	156	82	155	57	118	53
130	57	157	81	154	49	118	54
140	59	158	84	163	55	120	57
138	61	161	85	158	56	123	59
133	62	154	84	159	51	117	56
139	60	157	84	155	51	119	57
139	60	161	81	156	56	123	52
135	60	164	82	160	59	125	53
134	57	155	78	155	54	124	53
134	58	153	78	154	52	124	56
136	53	157	80	152	55	128	58
140	58	157	77	159	56	129	59
134	58	151	78	151	53	127	54
133	53	152	75	154	53	121	55
137	58	153	76	156	52	126	51
135	50	146	70	149	47	121	53
136	61	149	75	154	56	123	55

图 12 部分灰度值数据显示图
Fig.12 Partial gray value data display chart

在计算 MTF 值之前,需要精确确定目标区域,删除黑色底色最近的点,采用的办法是将检测区域的起始点+1,终止点-1,则令最终检测区域内缩 2 列,计算区域内的 MTF,最后取平均结果保留 4 位有效小数,存储最终结果。

3.5 测试系统实验结果

测试系统设计调试完成后,在实验室环境下对相机

进行测试。在测试系统软件中分别输入本机 IP 地址 192.168.0.3 与对方 (FPGA) IP 地址 192.168.0.2 以及端口号确定建立 UDP 通信连接,图 13 所示为测试系统界面,实时采集并显示出黑白条纹图。

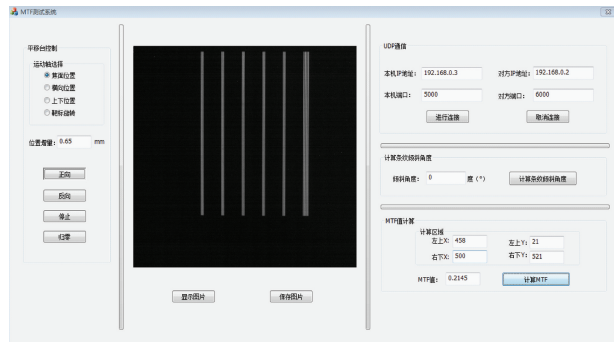


图 13 MTF 测试系统界面
Fig. 13 MTF test system interface

在实验中为了证明系统的适用性,利用不同型号相机拍摄黑白条纹图像进行测试,针对不同分辨率的图像,对获取到的黑白条纹图进行分析确定计算区域,将实验结果与人工计算方法结果进行比较。

人工计算方法是研究人员在相机研制完成后所采用的方法,同样是基于对比度法计算所得结果,不同的是研究人员通过人眼观察条纹图像亮度分布,根据主观感受判断图像中黑白条纹对比度较好的区域确定受检区域,进而通过对比度法获取 MTF 值,这种方法虽然存在人为误差,但是在相机研制单位使用较为普遍。

实验分别用 3 种不同型号的相机获取 3 种不同分辨率图像,分别是 2 048×2 049,2 564×2 162,2 045×256,通过分析图像灰度值确定受检区域,将黑白条纹对应灰度值代入式(3)中计算 MTF 值,取平均值作为最终结果。3 种分辨率黑白条纹图像分别进行了 10 次测试,实验分析对比数据如表 1~3 所示。

表 1 分辨率 2 048×2 049 图像测试结果		
Table 1 2 048×2 049 resolution image test results		
次数	人工 MTF 测试结果	实验 MTF 测试结果
1	0.189 6	0.297 4
2	0.213 9	0.312 5
3	0.194 7	0.303 5
4	0.234 8	0.335 4
5	0.190 2	0.300 1
6	0.226 1	0.326 9
7	0.236 9	0.329 8
8	0.199 1	0.309 2
9	0.221 5	0.338 2
10	0.203 1	0.342 9
标准差	0.0171 6	0.016 08

表 2 分辨率 2 048×2 162 图像测试结果		
Table 2 2 048×2 162 resolution image test results		
次数	人工 MTF 测试结果	实验 MTF 测试结果
1	0.096 3	0.234 5
2	0.214 9	0.326 4
3	0.178 7	0.283 1
4	0.225 6	0.332 4
5	0.230 9	0.352 6
6	0.102 1	0.271 9
7	0.245 8	0.364 9
8	0.234 9	0.352 1
9	0.149 3	0.268 6
10	0.246 7	0.359 5
标准差	0.054 89	0.043 82

表 3 分辨率 2 045×256 图像测试结果		
Table 3 2 045×256 resolution image test results		
次数	人工 MTF 测试结果	实验 MTF 测试结果
1	0.076 0	0.196 4
2	0.082 6	0.194 7
3	0.070 1	0.190 2
4	0.078 5	0.205 8
5	0.077 1	0.201 1
6	0.088 5	0.206 3
7	0.063 2	0.195 2
8	0.085 6	0.214 2
9	0.067 9	0.206 7
10	0.090 2	0.215 3
标准差	0.008 52	0.008 05

从表 1~3 可以看出,在系统的多组测试中,每组测试选取 10 次测试结果作为样本数据,观察每组数据的标准差,系统测试结果标准差都小于人工计算方法,可以看出测试系统具有很好的稳定性。同时观察表中可以看出,测试方法为人工进行 MTF 计算时,寻找最佳对比度条纹存在一定的主观性,搜索范围同样有限,人工判读并不一定能找到对比度最佳的条纹,计算结果存在误差。本测试系统利用灰度值曲线图判断对比度最佳的条纹,采取计算机判读的方法,提升了测量的准确度,避免人工判读引入的主观误差,对比人工计算方法的 MTF 测试结果,系统 MTF 测得结果更加具有一定可信度。

4 结 论

针对航空航天相机成像质量的需求以及其图像高速传输的特点,结合了 FPGA 完成了千兆以太网协议实现图像数据的高速传输,并在测试过程中对图像进行角度的修正调整测试系统保证黑白条纹与 CCD 像元行垂直满足测量条件,采用对比度法对调制传递函数进行测量,

通过提取有效图像区域的方法尽量减少受影响的像素点,提高计算精度,获取准确的计算结果,提高了图像分析的实时性和测试效率。经过测试对比实验数据证明了装置符合功能需求,且操作更加简便,计算结果更加准确,实现了对相机整机系统的性能评价。

参考文献

- [1] 伏瑞敏,邱丽清. 航天光学遥感器光学装调技术现状与展望[J]. 航天返回与遥感,2011,32(3):30-35.
FU R M, YUE L Q. Present state and perspectives of alignment technology for space optical remote sensor[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(3): 30-35.
- [2] 岳涛,李博,陈晓丽,等. 空间光学发展现状和未来发展[J]. 航天返回与遥感,2011,32(5):1-9.
YUE T, LI B, CHEN X L, et al. The current and future development of space optics[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(5): 1-9.
- [3] 刘洋. 空间相机成像质量自动评价方法研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
LIU Y. Research on automatic evaluation method of space camera imaging quality [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2011.
- [4] 王维,董吉洪,孟庆宇. 火星探测可见光遥感相机的发展现状与趋势[J]. 中国光学,2014,7(2):208-214.
WANG W, DONG J H, MENG Q Y. Current status and developing tendency of visible spectral remote sensing camera for mars observation[J]. Chinese Optics, 2014, 7(2):208-214.
- [5] 聂品,田海英,董斌,等. 矩形靶标测试 CCD 相机调制传递函数的研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1204002.
NIE P, TIAN H Y, DONG B, et al. Research of modulation transfer function measurement of CCD camera with rectangle target [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1204002.
- [6] TANAKA N, MORISHITA J, TSUDA N, et al. Effect of readout direction in the edge profile on the modulation transfer function of computed radiographic systems by use of the edge method [J]. Radiological Physics and Technology, 2013, 6(2): 474-479.
- [7] FERNANDEZ-OLIVERAS A, POZO A M, RUBINO M. Speckle-based modulation transfer function measurements for comparative evaluation of CCD and CMOS detector arrays[J]. Optical Review, 2013, 20 (1): 41-49.
- [8] 张绍军,高云国,薛向尧,等. 新型光学检测靶标静态指向精度评价分析[J]. 仪器仪表学报,2018,39(4): 18-25.
- [9] 吴泽鹏,曲耀斌,赵庆广,等. 基于地面周期靶标的光学遥感相机在轨调制传递函数测量方法[J]. 光学学报,2019,39(7):0728006.
WU Z P, QU Y B, ZHAO Q G, et al. On-Orbit measurement of modulation transfer function for optical remote sensing cameras based on periodic ground targets[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0728006.
- [10] 乔玉晶,曹岩,谭世征. 摄像机内图像传感器装调误差检验方法[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(2): 30-35.
QIAO Y J, CAO Y, TAN SH ZH. Test method for adjusting error of image sensor inside camera[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(2): 30-35.
- [11] 徐利刚,李岭. 基于 FPGA 的千兆以太网高速数据传输系统[J]. 仪表技术,2016(2):19-22,38.
XU L G, LI L. Gigabit ethernet high speed data transmission system based on FPGA[J]. Instrumentation Technology, 2016(2): 19-22, 38.
- [12] 亢烨,柯熙政,邱昌佩. 基于以太数据的无线激光通信系统透明传输设计[J]. 电子测量与仪器学报,2017, 31(5):700-707.
KANG Y, KE X ZH, QIU CH P. Design of data transparent transmission in WLC system based on ethernet[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5):700-707.
- [13] 高培淞,李彬,叶华,等. 航空相机控制系统通过软件产品线设计[J]. 国外电子测量技术,2018,37(6): 55-59.
GAO P S, LI B, YE H, et al. Design of control system software product line for aerial camera [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37 (6): 55-59.
- [14] 黄阳,李晓轩,牛锦川,等. 遥感相机实验室静态 MTF 测量误差分析[J]. 光学与光电技术,2017,15(2): 57-61.
HUANG Y, LI X X, NIU J CH, et al. Error analysis of static MTF measurement for remote sensor in laboratory [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2017, 15 (2): 57-61.
- [15] DUAN F L. The internet of things' monitoring and dispatching system for port based on SOCKET communication[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2111(241): 3245-3248.

- [16] 于合龙,刘浩洋,苏恒强,等. 基于图像 Canny 边缘检测和 Hough 变换算法的高温结构测量方法[J]. 吉林大学学报,2014,52(3):519-524.
YU H L, LIU H Y, SU H Q, et al. Method of temperature structure measurement based on canny edge detection and hough transformation algorithm [J]. Journal of Jilin University, 2014, 52(3): 519-524.
- [17] 赵芳,周旺辉,陈岳涛,等. 改进的 Canny 算子在裂缝检测中的应用[J]. 电子测量技术, 2018, 41(20): 107-111.
ZHAO F, ZHOU W H, CHEN Y T, et al. Application of improved Canny operator in crack detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(20): 107-111.
- [18] 李莉,王绪国. 局部二值模式耦合双阈值 LM 优化的火焰图像边缘检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6): 9-17.
LI L, WANG X G. Flame image edge extraction based on local binary mode coupled double threshold LM optimization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6): 9-17.
- [19] 王鑫,向阳,车英,等. 校靶镜检定装置光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(2): 83-87.
WANG X, XIANG Y, JU Y, et al. Optical design of calibrator verification device[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(2): 83-87.
- [20] 唐阳山,李栋梁,朱停仃,等. 基于 canny 和霍夫变换的车道线识别算法研究[J]. 汽车实用技术, 2017, 22: 81-83.
TANG Y SH, LI D L, ZHU T D, et al. Lane line recognition algorithm based on hough transform and canny [J]. Automobile Applied Technology, 2017, 22: 81-83.
- [21] 刘洋,胡君,吴伟平. 高分辨率 CCD 相机传递函数的实时计算[J]. 半导体光电, 2011, 32(5): 745-748.
LIU Y, HU J, WU W P. Real-time measurement of transfer function based on high-resolution CCD camera [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(5): 745-748.

作者简介



乔卫东(通信作者), 1992 年于陕西机械学院获得学士学位, 1999 年于西安理工大学获得硕士学位, 2006 年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为智能仪器与信息处理技术。

E-mail: qwd@xaut.edu.cn

Qiao Weidong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shaanxi Institute of Machinery in 1992, M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 1999, and Ph. D. degree from Xi'an University of Technology in 2006. Now he is an associate professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include intelligent instrument and information processing technology.