



激光辐照条件下光学相机像质评价方法研究

梁晓琳 周松青 周玲 包本刚

Research on optical camera imaging quality evaluation method under the condition of laser irradiation

Liang Xiaolin, Zhou Songqing, Zhou Ling, Bao Bengang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20211120>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学遥感卫星杂散光扫描测试系统

Scanning measuring system of stray light for optical remote sensing satellite

红外与激光工程. 2017, 46(9): 913001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0913001>

湍流变化对多孔径光学系统成像特性的影响

Influence of turbulence on imaging characteristics of multi-aperture optical system

红外与激光工程. 2021, 50(12): 20210189 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210189>

脉冲激光辐照太阳能电池响应及光电转化影响

Response of pulse laser irradiation solar cell and effect of photoelectric conversion

红外与激光工程. 2020, 49(S1): 20200262 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200262>

基于微通道板的像增强器增益饱和和效应研究

Research on the gain saturation effect of an image intensifier based on microchannel plate

红外与激光工程. 2017, 46(10): 1003005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201750.1003005>

空间翻滚目标激光消旋概念及天基应用分析

Concept of laser de-tumbling and its space-based application for space-based spinning target

红外与激光工程. 2020, 49(8): 20200203 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200203>

三温区梯度化学气相沉积ZnS制备

TTG-CVD based ZnS material preparation

红外与激光工程. 2021, 50(10): 20210004 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210004>

激光辐照条件下光学相机像质评价方法研究

梁晓琳, 周松青*, 周 玲, 包本刚

(湖南科技学院 智能制造学院, 湖南 永州 425199)

摘要: 倾斜刃边缘分析法是调制传递函数评价方法中最常用的方法之一, 该方法成像过程中光束透过能量高、实用性强, 具有广泛的应用前景。将倾斜刃边缘分析法应用于激光辐照条件下相机成像质量评价系统, 分析方法可信有效, 但需综合考虑刃边倾角、刃边两侧灰度对比度和背景噪声等影响因素。采用倾斜刃边缘分析法计算不同功率密度和光斑位置下系统不同的 MTF 曲线和 MTFA 值, 结果表明: 当激光功率密度偏小或光斑位置距刃边较远时, 刃边对比度和 MTF 值影响较小; 当激光功率密度逐步增大或光斑位置向刃边靠近时, 局部 MTF 呈降低趋势变化, 刃边对比度和 MTF 值影响逐渐增大, 干扰效果也逐渐明显, 尤其是在光斑覆盖目标时, MTF 值无法计算, 干扰效果达到最佳。因此, 基于倾斜刃边缘分析法可实现定性和定量评价光学相机成像质量。基于该仿真结果, 建立相应的激光辐照条件下光学相机成像质量测评系统, 可为光学相机激光辐照效应实验及其激光干扰效果评估提供技术支持。

关键词: 光学相机; 激光辐照; 成像质量评价; 调制传递函数; 倾斜刃边缘分析法

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211120

Research on optical camera imaging quality evaluation method under the condition of laser irradiation

Liang Xiaolin, Zhou Songqing*, Zhou Ling, Bao Bengang

(College of Intelligent Manufacturing, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, China)

Abstract: Slanted-edge imaging quality analysis method is one of the most commonly used methods in the evaluation of modulation transfer function(MTF). This imaging process method has broad application prospect because of its high beam transmission energy and strong practicability. The application of slanted-edge imaging quality analysis method to the camera imaging quality evaluation system under laser irradiation is credible and effective. However, the factors such as edge inclination angle, gray contrast on both sides of edge and background noise should be considered comprehensively. The MTF curves and modulation transfer function amplitude (MTFA) values of the system under different power densities and spot positions are calculated by the slanted-edge imaging quality analysis method. The results indicate that when the laser power density is low or the spot position is far from the edge, the influences of the edge contrast and the MTF value are weak. With the increase of laser power density or the spot position is close to the edge, the local MTF value decreases, the influences of the edge contrast and the MTF value gradually increase, and the interference effect is obvious gradually. Especially when the spot covers the target, the MTF value cannot be calculated, and the interference effect is the best. Therefore,

收稿日期: 2021-12-28; 修订日期: 2022-02-16

基金项目: 湖南省自然科学基金青年项目 (2019JJ50200); 湖南科技学院科学研究项目 (21XKY040); 湖南科技学院应用特色学科建设项目 (湘科院校发 [2018]83 号); 永州市 2021 年指导性科技计划项目 (2021-YZKJZD-009)

作者简介: 梁晓琳, 女, 副教授, 硕士, 主要从事电子学、激光技术及应用方面的研究。

通讯作者: 周松青, 男, 工程师, 硕士, 主要从事激光技术及其应用方面的研究。

the imaging quality of optical cameras can be evaluated qualitatively and quantitatively based on the slanted-edge imaging quality analysis method. Based on the simulation results, establishment of an imaging quality evaluation system of optical camera under laser irradiation can provide technical support for laser irradiation effect experiment and laser jamming effect evaluation of optical camera.

Key words: optical camera; laser irradiation; imaging quality evaluation; modulation transfer function; slanted-edge imaging quality analysis method

0 引言

光学相机是空间遥感设备的“眼睛”，也是遥感领域最重要的器件之一^[1-2]。光学相机对地面某些敏感目标拍照时，其成像质量受多方面因素的影响，使得图像信息量变少，侦察效果变差。在高能激光技术发展和运用的推动下，激光与物质相互作用，特别是激光对光学相机的辐照效应研究已成为热门研究课题。因此，为评估激光对光学相机的干扰损伤效果，有必要开展激光辐照条件下光学相机成像质量评价方法研究。

激光辐照相机的干扰效应和评估方法方面，国防科学技术大学、激光与物质相互作用国家重点实验室等单位开展了大量的研究工作。2009年，江天等人开展了激光辐照 3CCD 相机的饱和与干扰效应及评估方法研究，提出对目标特征图像与激光干扰后的图像采用跟踪匹配理论作为评价激光干扰效果的标准，应用光学相关模式识别技术作为激光干扰效果评估标准是比较客观有效的^[3]。2017年，袁航等人开展了激光连续激光辐照 TDI-CCD 典型光学相机实验及侧斑建模仿真，通过图像质量评估因子定量分析了不同入射条件下激光辐射对相机输出图像质量的影响^[4]。激光辐照条件下相机成像质量传递函数评价方面，国内部分高校和科研院所开展了实验研究，建立了实验平台，并自主研发了测试仪，但其测量精度、测量速度和系统完善性与国外发达国家还存在一定的差距，其研究成果也鲜见报道。因此，目前国内部分科研院所相机成像质量分析方面仍然采用一些进口的 MTF 测试仪，包括分析软件，如美国 OPTIKS 公司的 I-SITE 软件和硬件。

文中分析了基于倾斜刃边像分析法的光学传递函数在光学相机成像质量评价方法中的应用，通过计算验证了方法的可行性，开展了影响计算精度的因素分析和激光辐照条件下相机干扰效果测评分析，提出

了 MTFA (Modulation Transfer Function Amplitude) 值作为成像质量评价的定量指标，给出了激光辐照条件下光学相机成像质量测评系统建设方案，可为激光辐照条件下光学相机辐照效应实验及其干扰效果评估提供技术支持。

1 基于倾斜刃边像分析法的调制传递函数评价方法

常见的像质评价方法可分为传统像质评价方法和调制传递函数评价方法。传统像质评价方法主要有阴影法、星点法和分辨率法，通常通过主观评价物空间一点发出的光能量在像空间的分布情况来判断光学系统好坏。因此，这些方法不科学，受主观因素影响较大。光学传递函数评价方法是将光学系统看作是一个空间频率线性滤波器，它的成像质量可通过物和像之间的频谱之比来表征，反映了物经光学系统成像后像质的清晰程度^[5-10]。与传统方法相比，光学传递函数评价方法更加科学和全面，是一种灵敏度高、准确客观、能够定量分析和快速测量判定的方法^[11-12]。

倾斜刃边像分析法是调制传递函数评价方法中最常用的方法之一，该方法成像过程光束透过能量高、实用性强，且靶目标制作相对简单，具有广泛的应用前景^[13]。其方法是通过测量系统提取倾斜刃边的响应 ESF (Edge Spread Function)，对其进行微分得到线扩散函数 LSF (Line Spread Function)，然后进行傅里叶变换和归一化处理后得到系统 MTF 曲线和 MTFA 值 (即在奈奎斯特频率范围内，MTF 曲线与坐标轴所围面积同理想情况下面积之比) 可实现定量评价光学相机成像质量。

2 方法实现与仿真

2.1 方法实现

倾斜刃边像分析法是将刃边略微倾斜地成像在探测器上，刃边方向与探测器阵列面的行或列有一微

小夹角。在图像处理过程中,为降低刃边图像上的噪声影响,利用类间方差最大化阈值分割算法(Otsu)计算对Canny算子性能具有决定意义的高阈值,这种自适应方法不仅改善传统人为设定阈值Canny算法的分割效果,同时也增强测量应用适用性和实用性。具体实现步骤包括:(1)边缘点检测。选取计算MTF所需的刃边区域,通过Otsu算法求取最佳阈值,作为Canny算子的高阈值,得到包含目标边缘区域的分割图像。(2)边缘点拟合。针对刃边区域中每行的质心,采取线性拟合,得到图像刃边倾角。(3)亚像素采样与边缘配准。以亚像素间隔对选取的刃边区域进行离散采样,以每行的质心来配准刃边边缘,得到二维刃边信息数据。(4)ESF及LSF获取。将刃边数据投影为一维数据,对落在同一细分采用间隔中的数据点求平均值,从而获得平均采样ESF,采取平滑处理得到光滑边缘扩散函数,进而可差分求得LSF。(5)MTF获取。为提高采样频率,对LSF两边进行补零加窗,经傅里叶变换并归一化处理得到系统MTF。

2.2 方法仿真验证

为了评价方法的准确性,在Matlab环境下,使用已知的低通滤波器与理想刃边图像进行卷积操作得到退化的刃边图像。选取高斯低通滤波器,函数形式为:

$$P(x,y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中:标准差 σ 分别取0.5、1,退化后刃边图像和理想刃边图像如图1所示,退化后刃边图像的MTF曲线与理论MTF比较如图2所示。

由图1和图2可知,随着标准差 σ 的增大,低通滤波效果越明显,图像刃边边缘越模糊,MTF曲线的高频成分越小。图1中理想刃边倾角为 6° ,计算得到两幅退化图像刃边倾角分别为 $6.008^\circ(\sigma=1)$ 、 $6.007^\circ(\sigma=2)$,

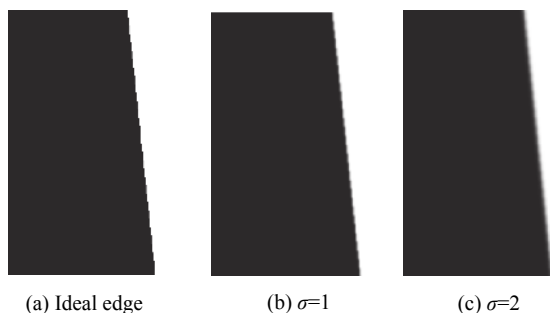


图1 退化后刃边图像比较

Fig.1 Comparison of degraded edge images

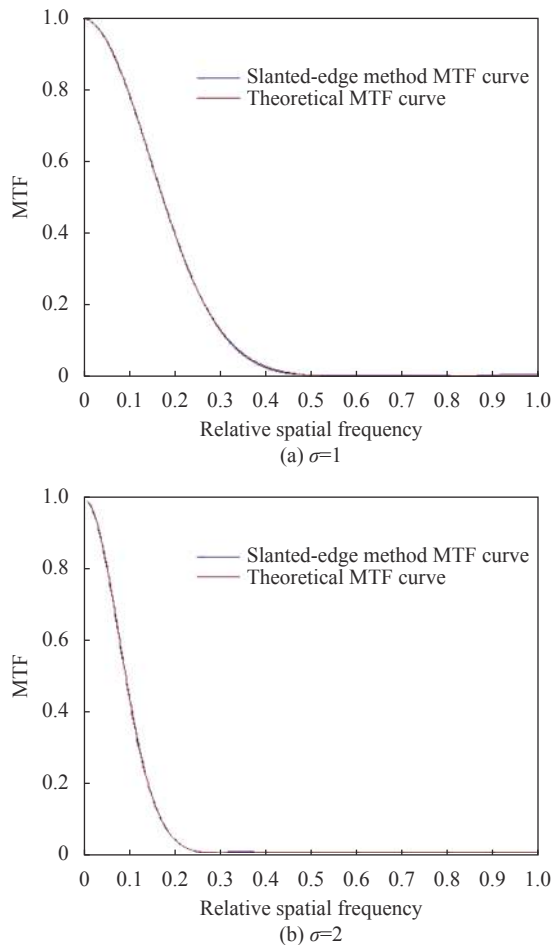


图2 MTF曲线对比

Fig.2 Comparison of MTF curve

计算结果与理想值一致。图2中基于刃边像分析法计算得到的MTF值与理论值基本一致,表明倾斜刃边像分析法得到的计算结果可信。按照定义,计算得到两幅退化图像的MTFA值见表1所示。由表可知,MTFA的计算值与理论值接近,相对误差很小;随着标准差 σ 的增大,MTFA值呈减小趋势变化。

表1 两幅退化图像MTFA值

Tab.1 MTF values of two degraded images

Standard deviation	MTFA calculated value	MTFA theoretical value	Relative error
$\sigma=1$	0.4316	0.4298	0.004
$\sigma=2$	0.2239	0.2248	0.004

2.3 影响计算精度的因素分析

(1) 刃边倾角影响

为分析不同刃边倾角对MTF计算精度的影响,针对一系列不同倾角的退化刃边图,利用文中方法开

展 MTF 计算,得到不同刃边倾角下的 MTFA 值,如图 3 所示。可以看出,刃边倾角过大或过小,都会与理论值出现较大的偏差。譬如,1°时相对误差接近 1.5%,40°时相对误差接近 2.5%。当刃边倾角在 5°~20°时,相对误差基本在小范围内波动,最大不超过 0.5%。因此,为保证 MTF 计算可靠性,刃边倾角的选取应尽量控制在 5°~20°之间。

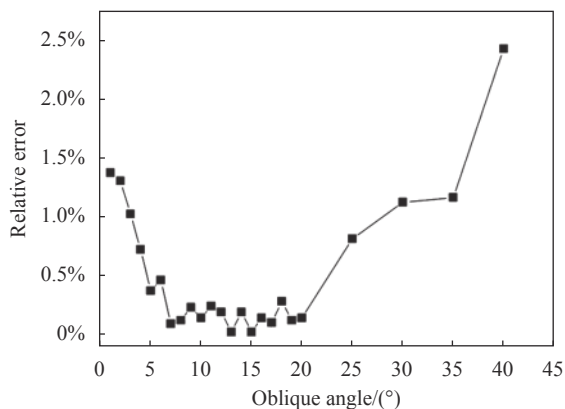


图 3 不同刃边倾角下 MTFA 值相对误差

Fig.3 Relative error of MTFA value under different edge obliquities

(2) 刃边两侧灰度对比度影响

为考察刃边两侧灰度对比度对 MTF 计算精度的影响,特意制作一系列不同对比度的刃边图,表示为 0 & 255、20 & 235、40 & 215、60 & 195、80 & 175、100 & 155 和 120 & 135,并将这些刃边图与高斯低通滤波器进行卷积操作,得到不同对比度下的 MTFA 值如表 2 所示。

由表 2 可知,不同灰度对比度时,MTFA 最大相对误差不超过 1%,表明计算算法可靠性较高。但灰度对比度较高时,计算结果的相对误差更小。因此,应尽量避免选取对比度较小的刃边图进行 MTF 计算。

(3) 背景噪声影响

实际应用中背景噪声不可避免,为衡量背景噪声对 MTF 计算精度的影响,特意为一幅退化刃边图像人为添加随机背景噪声,其中噪声幅值分别取 10%、20% 和 30%,得到 MTF 曲线如图 4 所示。

由上图可知,当刃边图像中存在噪声时,得到的 ESF 必然被噪声所污染。噪声将在 ESF 做差分运算的同时被放大,这将直接导致 LSF 的信噪比下降,最终引起 MTF 数值计算的失真,且噪声的存在引起高频处 MTF 值虚高。

表 2 不同灰度对比度下 MTFA 值

Tab.2 MTFA value under different gray contrast

Grayscale contrast	MTFA calculated value	Relative error
0 & 255	0.4303	0.0014
20 & 235	0.4292	0.0012
40 & 215	0.4301	0.0009
60 & 195	0.4286	0.0026
80 & 175	0.4275	0.0052
100 & 155	0.4257	0.0094
120 & 135	0.4280	0.0040

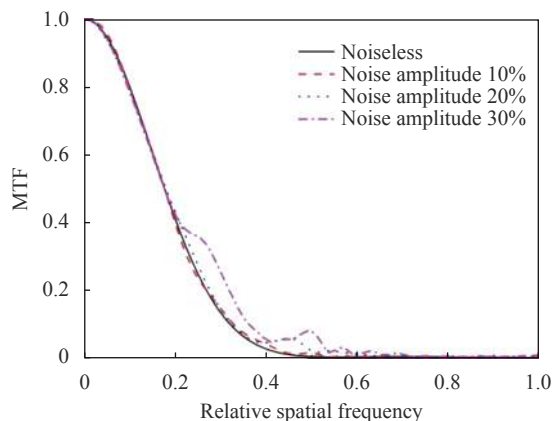


图 4 不同幅值背景噪声对 MTF 计算精度的影响

Fig.4 Influence of different amplitude background noises on the calculation accuracy of MTF

3 激光辐照条件下光学相机干扰效果测评

激光干扰光学相机时,随着激光功率密度大小和激光光斑位置的不同,干扰效果不尽相同。当激光功率密度增大,光斑影响区域增大,可一定程度实现干扰目的。当激光光斑与感兴趣目标重叠时,激光光斑可完全掩盖目标信息,达到完全干扰目的。图 5 和图 6 分别给出了不同激光功率密度和同一个激光功率密度条件下不同辐照位置的刃边图像退化效果。

由图 5 和图 6 可知,在不同激光密度和激光辐照位置情况下,干扰效果有所不同,随着激光功率密度增大,光斑区域亮度逐渐增强甚至饱和,刃边对比度逐渐减小,在出现饱和后,刃边对比度变化不明显;当激光光斑靠近刃边目标时,刃边对比度和干扰效果更为明显,尤其是当光斑覆盖目标时,可达到完全干扰的效果。图 7 和图 8 给出了对应的 MTF 曲线。

由图 7 和图 8 可知,随着激光功率密度逐渐增

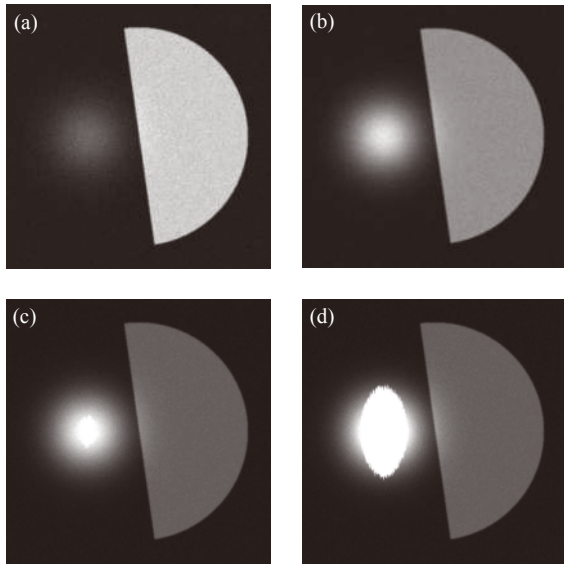


图 5 不同激光功率密度对相机干扰效果影响

Fig.5 Interference effect of optical camera under different laser power densities

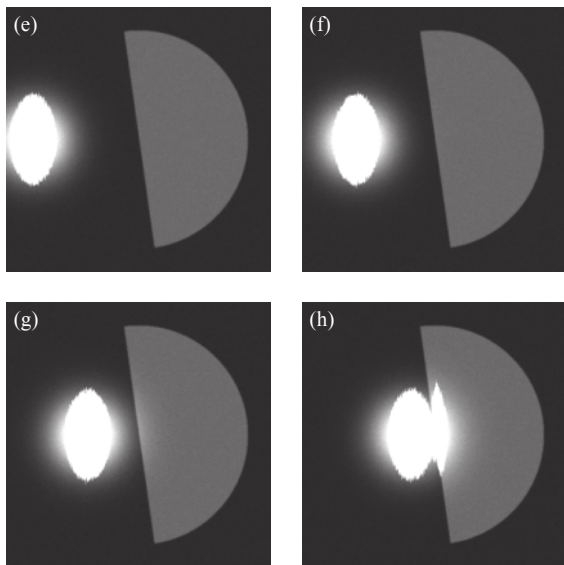


图 6 不同光斑位置对相机干扰效果影响

Fig.6 Interference effect of optical camera under different spot positions
 大,局部 MTF 值随之逐渐减小;随着光斑逐渐靠近刃边区域,局部 MTF 值也随之降低。当光斑距离刃边较远时,刃边对比度和 MTF 值影响较小;当光斑距离刃边较近时,刃边对比度和 MTF 值影响较大;尤其是在光斑覆盖目标时,MTF 值无法计算,干扰效果达到最佳。表 3 给出了不同干扰图的 MTFA 计算值,表明:随着激光功率密度增大和光斑位置靠近,MTFA 值均呈现降低趋势,且变化规律同上。由此表明,MTFA 值越低,图像质量也差,激光干扰效果越佳。

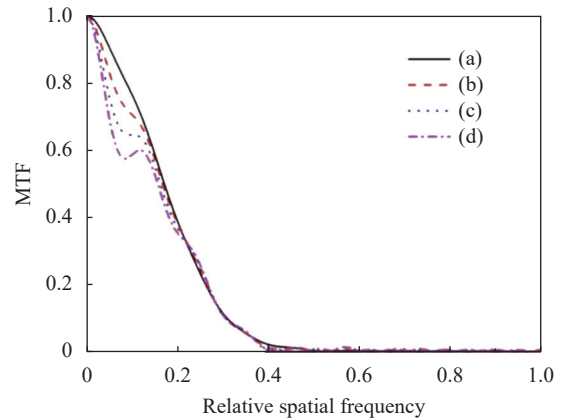


图 7 不同激光功率密度时 MTF 曲线

Fig.7 MTF graphs under different laser power densities

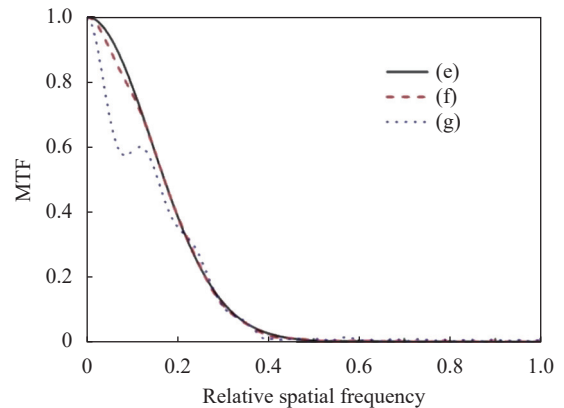


图 8 不同光斑位置时 MTF 曲线

Fig.8 MTF graphs under different spot positions

表 3 不同干扰图的 MTFA 值

Tab.3 MTFA values of different interference graphs

Interference graph	(a)	(b)	(c)	(d)
MTFA	0.4110	0.3924	0.3736	0.3559
Interference graph	(e)	(f)	(g)	(h)
MTFA	0.4177	0.4091	0.3559	-

因此,MTFA 值可作为成像质量评价的定量指标,可定量测评光学相机在激光辐照条件下的受扰效果。

4 激光辐照条件下光学相机像质测评系统建设方案

通过以上仿真计算,建成一套基于倾斜刃边缘分析法的调制传递函数测试系统,可开展光学相机成像质量的评价与分析,为定量表征或评价激光辐照条件下光学相机成像质量评价提供技术平台。图 9 为激光辐照条件下光学相机像质测评系统建设方案。

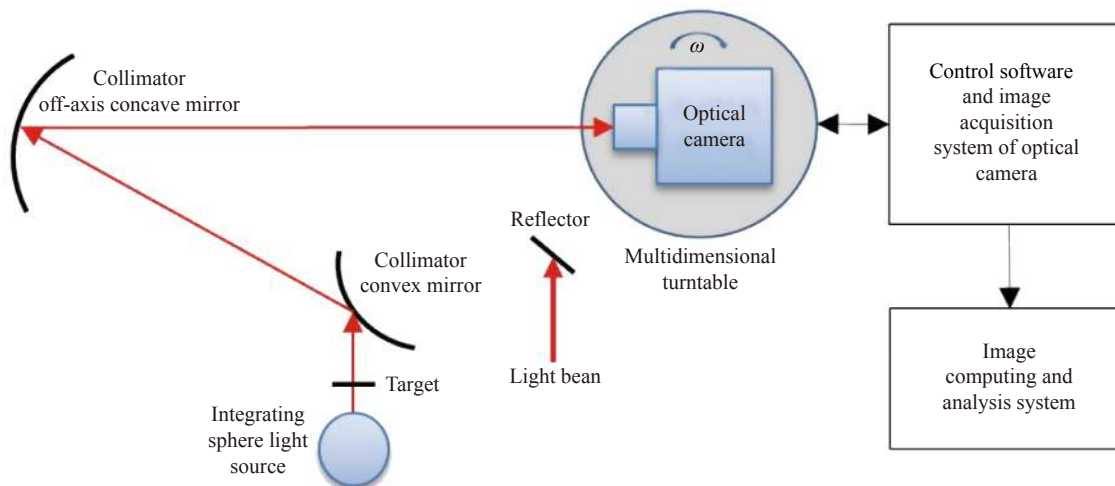


图 9 激光辐照条件下光学相机像质测评系统建设方案

Fig.9 Construction scheme of image quality evaluation system for optical camera under laser irradiation

4.1 系统主要技术指标

系统由积分球光源、刀口靶标、平行光管、模拟相机、测评分析系统、辐照光源和反射镜等部分组成,主要技术指标如下:

光源与靶标:光源采用直流供电的积分球光源,靶标选取标准刀口靶标(可见光照明)。可见光照明用于对靶标照明,亮度可调,可使用计算机控制。

平行光管:波像差优于 $\lambda/15$,有效口径 $\Phi 200$ mm,焦距 2 000 mm,满足全口径覆盖、焦距匹配的测试要求。为确保多波段工作模式,采用离轴反射式平行光管。

模拟相机:选取可见至近红外波段、近红外波段和中红外波段相机作为研究对象。其中可见至近红外波段模拟相机光学口径 $\Phi 180$ mm、焦距 900 mm、中心遮拦 $\Phi 50$ mm、视场 ± 0.5 、波像差 $\lambda/15$ 、像元数目 2 700、像元大小 $11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$ 、中心距 $11 \mu\text{m}$ 、光谱响应中心波长 550 nm(长波限 1 100 nm),配有相机多维调整转台,具备同步扫描成像功能。近红外波段模拟相机光谱带宽 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 、分辨率 320×256 、像元大小 $30 \mu\text{m}$ 、有效像元率 $>99\%$ 、帧频 100 Hz,曝光时间 $1 \mu\text{s} \sim 20 \text{ms}$ (低增益)可调,冷却方式为液氮冷却。中红外波段模拟相机光谱带宽 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 、分辨率 320×256 、灵敏度(NETD) $<16 \text{mK}$ 、有效像元率 $>99.5\%$ 、帧频 320 Hz、曝光时间大于 $3.0 \mu\text{s}$,全范围可调,冷却方式为液氮冷却。

测评分析系统:测评分析系统主要完成图像显示和采集,对采集到的图像进行处理,可求得刃边扩散

函数、线扩散函数、调制传递函数、信噪比、像面照度均匀性等参数。

辐照光源和反射镜:辐照光源根据实验对象(模拟相机)进行选择,常见的有可见光、近红外和中红外激光光源。反射镜具有平移、俯仰和高度可调功能,以确保反射光准直入瞳。

4.2 系统装调与工作流程

系统照明光源采用直流供电的积分球对光源进行均匀处理,避免在对系统输出进行微分时系统的扩散函数偏差带来较大误差,得到的结果失真度较小。刀口靶标安置在平行光管的焦平面处,主要用于模拟无穷远的目标效果。平行光管采用离轴反射式平行光管,其安装必须与光学相机镜头同光轴。模拟相机结构和指标设计参考国内外典型光学相机的光学结构,模拟相机置于多维转台上,便于光路调节和激光对相机焦平面不同位置辐照条件下的像质分析^[14-15]。辐照光源后端可增加分束镜和衰减片来调整入瞳激光功率。像质测评分析系统包括图像采集模块、图像处理模块和 MTF 计算模块,其中图像采集模块的功能是控制 CCD 采集图像和保存采集到的图像,图像处理模块主要是对图像进行预处理和降噪处理,MTF 计算模块的作用是频谱标定和计算。

测试过程中,采用“启动照明光源-光源准直入瞳、测评分析系统调试-辐照光源启动与调试-辐照光源入瞳-测评分析系统调试与计算”的流程进行调试和数据采集。其中刀口靶标被积分球光源均匀照亮,

经平行光管准直后成像于光学系统焦平面上; 辐照激光经可调反射镜和平行光管, 并与照明光源近似同轴; 相机入瞳光由成像器件转换为模拟/数字图像信号, 最后由评价软件对倾斜刃边图像数据进行计算分析得到被测系统的刃边扩散函数曲线、线扩散函数曲线、系统 MTF 曲线和 MTFA 值。

5 结束语

基于倾斜刃边像分析法的调制传递函数评价方法在光学相机像质评价中具有一定的应用性和客观性。为保证计算方法可信有效, 刃边倾角的选取应尽量控制在 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间为佳, 此时相对误差在小范围内波动, 最大不超过 0.5%; 尽量选取对比度较大的刃边图进行 MTF 计算, 可实现计算结果相对误差更小; 减少背景噪声, 避免 MTF 数值计算失真和高频处 MTF 值虚高现象发生。文中开展了不同激光功率密度和不同激光光斑位置时刃边干扰效果仿真, 计算分析了不同干扰图的 MTF 曲线和 MTFA 值, 提出 MTFA 值可作为成像质量评价的定量指标, 给出了基于倾斜刃边像分析法的激光辐照条件下相机成像质量测评系统建设方案, 系统可实现定性或定量、实时或离线分析相机光电组件在激光辐照条件下的损伤效果评价。由于靶标制作简单、成像过程透过能量高、实用性强, 该方法可为开展相应的辐照效应实验及评估工作提供技术支持。

参考文献:

- [1] Sun Yongxue, Xia Zhentao, Jiang Shouwang, et al. Optical system design of remote sensing camera with visible light all-day [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0114003. (in Chinese)
- [2] Zhang Xuanzhe, Wang Yan, Wang Jiahua, et al. Image clarification and point cloud calculation under turbulence by light field camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20200053. (in Chinese)
- [3] Jiang Tian. Study of saturated interference effect and interference assessment methods of 3CCD camera irradiated by laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [4] Yuan Hang, Wang Xiaorui, Li Dancui, et al. Modeling and simulation analysis for crosstalk effects and secondary spots of laser irradiation on TDI-CCD camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(12): 1214001. (in Chinese)
- [5] Masaoka Kenichiro. 52-4: Simulation of dynamic MTF measurement method for pixelated displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(1): 721-724.
- [6] Monnin P, Verdun F R, Bosmans H, et al. A comprehensive model for x-ray projection imaging system efficiency and image quality characterization in the presence of scattered radiation [J]. *Phys Med Biol*, 2017, 62(14): 5691-5722.
- [7] Zhao Jiawang, Zhang Yunhai, Wang Famin, et al. Line-scanning confocal microscopic imaging based on virtual structured modulation [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 431-445. (in Chinese)
- [8] Jiang Tingting, Feng Huaqun, Li Qi. Design on internal focusing optical system with zoom lens of freeform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20200290. (in Chinese)
- [9] Liu Chao, Ding Yalin, Tian Dapeng, et al. Dynamic modulation transfer function analysis and research of image rotation for aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0211001. (in Chinese)
- [10] Lü Bo, Feng Rui, Kou Wei, et al. Optical system design and stray light suppression of catadioptric space camera [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 822-831. (in Chinese)
- [11] Qiao Weidong, Li Yue, Guo Liang. Development of device for imaging performance test of aerospace camera [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(9): 9-16. (in Chinese)
- [12] Min Jung Whan, Jeong Hoi Woun. Evaluation of angle optimization on edge test device setting in modulation transfer function [J]. *Journal of Radiological Science and Technology*, 2020, 43(1): 15-21.
- [13] Guan Mningzhen, Zhang Xiaohui, Zhang Ning. MTF measurement of CCD digital camera based on improved slanted-edge method [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(1): 100-104. (in Chinese)
- [14] Xu Zhenbang, Zhu Deyong, He Shuai, et al. Optimization of spatial micro-vibration simulation platform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2590-2601. (in Chinese)
- [15] Zhi Xiyang, Zhang Shuqing, Zhang Wei, et al. MTF space-variant blurring resulted from platform vibration of TDICCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1432-1438. (in Chinese)