物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

光源光谱特性对空间相机调制传递函数检测的影响

刘尚阔 王涛 李坤 曹昆 张玺斌 周艳 赵建科 姚保利

Influence of spectral characteristics of light sources on measuring space camera modulation transfer function

Liu Shang-Kuo Wang Tao Li Kun Cao Kun Zhang Xi-Bin Zhou Yan Zhao Jian-Ke Yao Bao-Li

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 70, 134208 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201575
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.70.20201575
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

Bayer滤波型彩色相机调制传递函数测量方法
A method to measure the modulation transfer function of Bayer filter color camera
物理学报. 2017, 66(7): 074204 https://doi.org/10.7498/aps.66.074204

一种新型的液闪阵列成像屏空间分辨特性
Spatial resolution of novel liquid scintillating capillary array
物理学报. 2020, 69(6): 062801 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191545

偏振双向衰减对光学成像系统像质影响的矢量平面波谱理论分析
Analysis of the influence of diattenuation on optical imaging system by using the theory of vector plane wave spectrum
物理学报. 2017, 66(8): 084202 https://doi.org/10.7498/aps.66.084202

天光背景下混浊大气中成像质量的分析方法
Image quality analysis method under background radiation in turbid atmosphere
物理学报. 2018, 67(8): 088701 https://doi.org/10.7498/aps.67.20172625

分形结构稀疏孔径阵列的成像性能
Imaging performance of fractal structuresparse aperture arrays
物理学报. 2019, 68(19): 199501 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190818

基于相干调制成像的光学检测技术
Technique of detecting optical components based on coherent modulation imaging
物理学报. 2020, 69(17): 174202 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200224

光源光谱特性对空间相机调制传递函数检测的影响

刘尚阔[1)2)†] 王涛[1)] 李坤[1)] 曹昆[1)] 张玺斌[1)]
周艳[1)] 赵建科[1)] 姚保利[1)]

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2020 年 9 月 22 日收到; 2021 年 2 月 21 日收到修改稿)

调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 检测是评价空间相机像质的重要手段. 空间相机光学系统透过率和色差、探测器量子效率均与波长相关, 采用不同光谱特征的光源所得到的 MTF 会出现偏差, 光源光谱特性的影响不可忽略. 针对这一问题, 提出了一种分析光源光谱特性对空间相机 MTF 检测结果影响的方法, 设计了空间相机光谱响应率和单色 PSF 标定装置及方法. 利用所提方法及标定结果, 计算了五种光源检测空间相机 MTF 时的理论值, 发现氙灯和其他四种光源的 MTF 值偏差较大. 对比卤钨灯和氙灯检测 MTF 时的理论值, 发现卤钨灯所得 MTF 在全频段内均大于氙灯所获取的 MTF, 二者之间的偏差在中高频处最大, 最大偏差为 0.075. 搭建了实验装置, 分别采用卤钨灯和氙灯作为光源, 利用倾斜刃边法检测 MTF, 发现二者所得 MTF 在各个频率点处的分布特征及偏差与理论计算结果相同, 且最大偏差为 0.057. 理论及实验结果表明, 本文方法能够准确评估光源光谱特性对空间相机 MTF 检测的影响.

关键词: 光学检测, 调制传递函数, 空间相机, 光源光谱特性

PACS: 42.87.–d, 42.30.Lr, 42.79.Pw, 06.20.Dk **DOI:** 10.7498/aps.70.20201575

1 引 言

空间相机指搭载于卫星平台上用来获取目标信息的传感器, 包括遥感相机、空间目标观测相机、空间望远镜等, 被广泛应用于对地遥感、空间目标监视、天文观测等领域. 调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 是成像系统点扩散函数 (point spread function, PSF) 傅里叶变换的模, 也可以理解为成像系统对不同频率本征函数的本征值的模 [1]. MTF 能够反映相机整个空间频率段内的信息传递能力 [2,3], 在空间相机光学设计、光学系统装调、整机像质检测等阶段均有涉及. 空间相机成像目标距离通常较大, 一般认为目标位于无穷远, MTF 检测时需要采用平行光管来模拟目标. 光电对接、真空焦面预置、力学试验、热试验等阶段, 均需检测空间相机 MTF, 以充分验证其成像质量.

根据平行光管焦面处靶板的不同, 空间相机 MTF 检测的常用方法有狭缝法 [4–7]、矩形周期靶法 [8–10] 和刀口靶法 [2,3,11–13]. 狭缝法从空间相机采集狭缝像中获取线扩散函数 (line spread function, LSF), 对 LSF 进行傅里叶变换并取模得到 MTF. 该方法对狭缝两个刃边的平行度和直线度、狭缝宽度和厚度的加工精度有很高的要求, 且测量结果需要扣除狭缝宽度引入的误差. 矩形周期靶法需根据平行光管焦距、空间相机焦距和探测器像元尺寸, 加工具有特定线宽的矩形周期靶标, 其原理清晰、

† 通信作者. E-mail: liushangkuo@opt.ac.cn

© 2021 中国物理学会 Chinese Physical Society

数据处理量低, 但只能检测特定空间频率处的MTF, 且检测精度易受靶标对比度和对准精度的影响. 刀口靶法只需要加工一条直边, 加工精度要求相对较低, 其尺寸与 MTF 检测系统和空间相机参数无关. 刀口靶法通过分析刀口靶图像, 得到空间相机的边缘扩散函数 (edge spread function, ESF), ESF 微分后得到 LSF, 对 LSF 进行傅里叶变换并取模得到 MTF. 刀口靶经空间相机成像后通常成缩小像, 导致直刀口法 ESF 欠采样[11], 需要对刀口进行扫描才能提取相机的 ESF[12]. 倾斜刃边法是一种改进刀口靶法, 通过旋转刀口靶使其与空间相机探测器成一定夹角, 再提取过采样 ESF, 可以避免直刀口法的 ESF 欠采样问题[13]. 目前, 倾斜刃边法的主要研究热点为噪声影响分析[12,14,15]、ESF 拟合函数模型[2,16–18]和刃边倾角估计[3,19–21]等内容, 以及在多方向 MTF 同时检测[22]、彩色相机 MTF 检测[11]等领域的应用研究.

综上, 尚未见空间相机 MTF 检测时光源光谱特性影响研究的文献报道, 而平行光管光学系统透过率、被测相机光学系统透过率和色差、探测器光谱响应等均存在特定的光谱分布特征, 导致采用不同光谱分布特征的光源检测 MTF 时会引入测试误差, 降低检测精度. 比如分别采用卤钨灯和氙灯作为光源检测某空间相机 MTF 时, Nyquist 频率处 MTF 的差异可达 0.03. 此外, 空间相机光学系统设计时, 一般根据成像目标的光谱特征来设置空间相机工作波长的权重, 而检测 MTF 时所用光源通常会偏离光学设计时的光谱分布特征, 导致 MTF 检测结果偏离理论设计值. 因此, 研究评估光源光谱特性对空间相机 MTF 影响的方法具有重要意义.

本文推导了光源光谱特性对空间相机 MTF 影响的理论模型, 给出了空间相机 MTF 检测系统的组成, 设计了空间相机 MTF 检测系统光谱响应率和空间相机光学系统单色 PSF 标定装置及方法, 并通过实验进行了验证. 本文方法刻画了光源光谱特性影响空间相机 MTF 检测精度的机理, 能够准确评估光源光谱特性对空间相机 MTF 的影响.

2 光源光谱特性对空间相机 MTF 影响建模

2.1 空间相机 MTF 检测系统组成

空间相机 MTF 检测系统组成如图 1 所示, 主要包括积分球光源、靶板、平行光管和空间相机. 积分球光源位于平行光管焦面后方, 其输出非相干光均匀照明位于平行光管焦面处的靶板处, 经平行光管准直后出射平行光, 模拟无穷远目标. 空间相机对靶板成像, 通过分析靶板图像检测空间相机 MTF. 目前, 空间相机 MTF 检测时, 常用光源包括钨丝灯、氙灯等光源, 其中钨丝灯应用较多, 但其色温偏低, 而氙灯光谱色温则更接近太阳光. 本文重点研究光源光谱特性对 MTF 检测的影响.

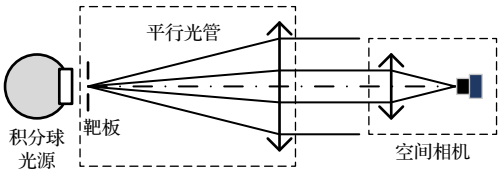

图 1 空间相机 MTF 检测系统组成

Fig. 1. Configuration of a space camera MTF measurement system.

2.2 空间相机 MTF 检测系统成像模型

一般情况下, 空间相机可以近似为线性移不变系统, 当采用非相干光源照明时, 空间相机 MTF 检测系统可按如下成像模型表征:

$$I(i,j) = [O(u,v) * \mathrm{PSF}(u,v)] * \mathrm{rect}(u,v) \times \mathrm{comb}(u,v), \tag{1}$$

式中, $I(i,j)$为相机所采集靶板图像(i,j)像素位置处的灰度值; $O(u,v)$为 MTF 检测用靶板强度分布; $*$表示卷积运算; $\mathrm{rect}(u,v)$为二维矩形函数, 表示相机探测器像元感光区域对输入光信号的平均作用:

$$\mathrm{rect}(u,v) = \mathrm{rect}\left(\frac{u}{d}\right)\mathrm{rect}\left(\frac{v}{d}\right). \tag{2}$$

公式 (1) 中的$\mathrm{comb}(u,v)$为二维梳妆函数, 对光学系统所成连续图像进行离散采样:

$$\mathrm{comb}(u,v) = \frac{1}{d^2}\mathrm{comb}\left(\frac{u}{d}\right)\mathrm{comb}\left(\frac{v}{d}\right). \tag{3}$$

对公式 (1) 进行整理可得

$$I(i,j) = [\mathrm{PSF}(u,v) * \mathrm{rect}(u,v) \times \mathrm{comb}(u,v)] * O(u,v). \tag{4}$$

从上式可以看出, 系统的本征函数为$[\mathrm{PSF}(u,v) * \mathrm{rect}(u,v) \times \mathrm{comb}(u,v)]$, 经傅里叶变换可得到系统的 OTF, 取模可得到整个空间相机 MTF 检测系统的 MTF 表达式[1]:

$$\mathrm{MTF} = \left|\mathrm{FT}\left\{\mathrm{PSF}(u,v) * \mathrm{rect}(u,v) \times \mathrm{comb}(u,v)\right\}\right|, \tag{5}$$

式中FT表示傅里叶变换.

公式 (1) 中的 PSF 为整个空间相机 MTF 检测系统光学部分的 PSF, 包括平行光管和空间相机光学系统两部分, 可以按下式表示:

$$\mathrm{PSF} = \mathrm{PSF_{col}} * \mathrm{PSF_{cam_optics}}, \tag{6}$$

式中, $\mathrm{PSF_{col}}$ 为平行光管的 PSF, $\mathrm{PSF_{cam_optics}}$ 为空间相机光学系统的 PSF.

通常, 平行光管像差经严格校正后, 其波像差 RMS 一般要求全视场优于 0.05λ [23], 可看作是衍射受限光学系统. 而整个 MTF 检测系统的口径受空间相机光瞳限制, 故 $\mathrm{PSF_{col}}$ 可近似为理想冲击响应函数, $\mathrm{PSF} = \mathrm{PSF_{cam_optics}}$.

2.3 光源光谱特性影响建模

空间相机 MTF 检测系统中与光谱特性相关的因素包括光源、平行光管透过率 (或反射率)、空间相机光学系统透过率 (或反射率)、空间相机探测器量子效率等. 此时, 平行光管焦面处靶板应引入光源光谱能量分布特征:

$$O_\lambda(u,v) = P_\lambda \times O(u,v), \tag{7}$$

其中, λ 为整套检测系统工作波段范围内的一个波长, P_λ 为波长 λ 处积分球光源的光谱能量.

通常, 整套检测系统的 PSF 也具有光谱特性, 即不同波长的 PSF 由于系统透过率、像差特性的不同而具有不同的函数形式, 按下式表示:

$$\mathrm{PSF}_\lambda(u,v) = \tau_{\mathrm{col}_\lambda} \times \tau_{\mathrm{cam}_\lambda} \times \mathrm{PSF}_{\mathrm{cam_optics}_\lambda}(u,v), \tag{8}$$

其中, PSF_λ 为空间相机 MTF 检测系统单色 PSF, $\tau_{\mathrm{col}_\lambda}$ 为平行光管在波长 λ 处的透过率 (或反射率), $\tau_{\mathrm{cam}_\lambda}$ 为空间相机光学系统在波长 λ 处的透过率 (或反射率), $\mathrm{PSF}_{\mathrm{cam_optics}_\lambda}$ 为空间相机光学系统单色 PSF.

此外, 空间相机探测器量子效率也具有光谱特性, 利用公式 (4) 可得单色非相干光源照明时空间相机 MTF 检测系统的成像方程:

$$I_\lambda(i,j) = \eta_\lambda \times [\mathrm{PSF}_\lambda(u,v) * \mathrm{rect}(u,v) \times \mathrm{comb}(u,v)] * O_\lambda(u,v), \tag{9}$$

其中 η_λ 为波长 λ 处空间相机探测器的量子效率.

将公式 (7) 和公式 (8) 带入公式 (9) 并展开, 整理可得

$$I_\lambda(i,j) = \{C_\lambda \times P_\lambda \times [\mathrm{PSF}_\lambda(u,v) * \mathrm{rect}(u,v)] \times \mathrm{comb}(u,v)\} * O(u,v), \tag{10}$$

式中 $C_\lambda = \eta_\lambda \times \tau_{\mathrm{col}_\lambda} \times \tau_{\mathrm{cam}_\lambda}$. C_λ 相当于空间相机 MTF 检测系统的光谱响应率, 综合了空间相机探测器量子效率、平行光管透过率和空间相机光学系统透过率随波长变化的特性.

对空间相机探测器在整个波段范围内各个波长的响应值进行积分, 即可得到其实际采集图像的灰度值:

$$\begin{aligned} I(i,j) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_\lambda(i,j)\,\mathrm{d}\lambda \\ &= \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_\lambda \times P_\lambda \times [\mathrm{PSF}_\lambda(u,v) * \mathrm{rect}(u,v)] \times \mathrm{comb}(u,v)\,\mathrm{d}\lambda \right\} * O(u,v), \end{aligned} \tag{11}$$

式中 λ_1 和 λ_2 分别对应空间相机工作波段内的最小值和最大值.

从上面分析可知, 考虑光源光谱特性、空间相机 MTF 检测系统光谱响应率后, 系统的本征函数为

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_\lambda \times P_\lambda \times [\mathrm{PSF}_\lambda(u,v) * \mathrm{rect}(u,v)] \times \mathrm{comb}(u,v)\,\mathrm{d}\lambda,$$

对其进行傅里叶变换并取模, 得到整个空间相机 MTF 检测系统的 MTF 表达式:

$$\mathrm{MTF} = \left| \mathrm{FT}\left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_\lambda \times P_\lambda \times [\mathrm{PSF}_\lambda(u,v) * \mathrm{rect}(u,v)] \times \mathrm{comb}(u,v)\,\mathrm{d}\lambda \right\} \right|. \tag{12}$$

上式表明, 由于光源光谱特性, 空间相机 MTF 检测系统光谱响应率、空间相机单色 PSF 随波长而变化. 因此, 光源光谱特性的变化将引起 MTF 检测结果的变化, 本文将对该因素进行研究, 以评估光源光谱特性对空间相机 MTF 检测的影响.

2.4 光源光谱特性相关参数的标定原理

公示 (12) 表明, 光源能量分布、空间相机 MTF 检测系统光谱响应率、空间相机单色 PSF 随波长变化, 是 MTF 检测结果受光源光谱特性影响的根本原因. 因此, 前述各因素经标定后, 即可定量研究光源光谱特性对 MTF 检测结果的影响.

光源能量分布可以直接用光谱辐射度计进行标定. 空间相机 MTF 检测系统的光谱响应率标定原理如图 2 所示. 整套标定系统由单色仪、光谱辐射度计、积分球、平行光管和空间相机组成. 平行

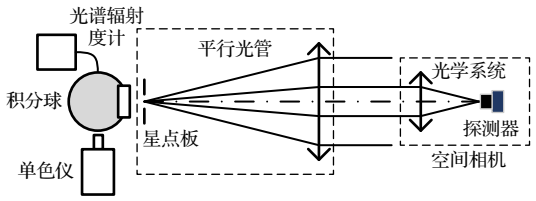

图 2 空间相机 MTF 检测系统光谱响应率标定原理图

Fig. 2. Schematic of calibrating the spectral response of the space camera MTF measurement system.

光管焦面处放置星点板, 选取直径较大的星点板, 使空间相机对其成面目标像. 空间相机 MTF 检测系统光谱响应率标定时, 空间相机已完成光电对接, 光谱响应率的具体标定步骤如下:

Step1 平行光管焦面后方放置积分球, 积分球侧面有两个小孔, 用于安装单色仪出射光纤和光谱辐射度计探头, 空间相机位于平行光管出光口正前方.

Step2 平行光管焦面处安装星点板, 调整空间相机位置, 使其所成星点板图像位于空间相机探测器靶面中心.

Step3 将空间相机工作波段进行等分, 得到多个波长位置 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$, 控制单色仪依次输出相应波长的单色光. 光谱辐射度计采集积分球出光口的光谱福亮度, 记为 L_{λ_i}. 空间相机采集星点板图像, 并计算其灰度均值, 记为 I_{λ_i}.

Step4 按下式计算整套空间相机 MTF 检测系统的归一化光谱响应率:

$$C_{\lambda_i} = \left(\frac{I_{\lambda_i}}{L_{\lambda_i}}\right) \Big/ \max_i \left\{\frac{I_{\lambda_i}}{L_{\lambda_i}}\right\}, \tag{13}$$

式中 $\max\limits_i \{I_{\lambda_i}/L_{\lambda_i}\}$ 表示 $I_{\lambda_i}/L_{\lambda_i}$ 的最大值.

空间相机光学系统单色 PSF 标定原理如图 3 所示, 整套标定系统包括单色仪、平行光管、空间相机光学系统和显微测量系统. 显微测量系统由显微物镜、中继镜和探测器组成. 平行光管焦面处放置星点板, 其直径 D_{star} 需满足

$$D_{\text{star}} \leqslant \frac{2.44\lambda_c}{D_{\text{cam}}} f_{\text{col}}, \tag{14}$$

式中, λ_c 为空间相机的中心波长, D_{cam} 为空间相机入瞳直径, f_{col} 为平行光管焦距.

空间相机光学系统单色 PSF 的具体标定步骤如下:

Step1 将单色仪置于平行光管焦面后方, 空间相机光学系统固定于平行光管和显微测量系统之间, 平行光管焦面处放置鉴别率板;

Step2 调整平行光管、空间相机光学系统和显微测量系统之间的位置关系, 使三者光轴平行;

Step3 调整显微测量系统位置, 使其对鉴别率板成像最清晰, 此时, 将鉴别率板更换为星点板;

Step4 按光谱响应率标定时的波长位置, 控制单色仪依次输出相应波长的单色光, 利用显微测量系统采集并存储空间相机光学系统的单色 PSF.

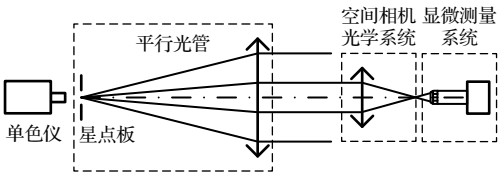

图 3 空间相机光学系统单色 PSF 标定原理图

Fig. 3. Schematic of calibrating the monochrome PSF of the optical system of a space camera.

3 实验验证

3.1 空间相机 MTF 检测系统光谱特性相关参数标定

3.1.1 光谱响应率标定

空间相机 MTF 检测系统光谱响应率标定实验中, 平行光管为离轴三反结构, 其焦距为 5000 mm, F 数为 10, 焦面处安装直径为 1 mm 的星点板. 实验用空间相机由 Sigma 镜头和 Cannon EOS 5D SR 相机组成, Sigma 镜头焦距为 1000 mm, F 数为 5.6, Cannon EOS 5D SR 相机的像元尺寸为 4.14 μm. 实验中采用纽比特公司的 Omno30300 型单色仪, 其输出单色光经光纤导入积分球开口处. 将美国 ASD 公司的 FieldSpec 型光谱辐射度计的探头 (10 度探头) 固定在积分球另一开口处, 采集光谱福亮度.

单色仪在空间相机工作波段 (375—750 nm) 内每隔 5 nm 输出单色光, 光谱辐射度计采集单色仪输出光的光谱福亮度, 空间相机采集星点板图像, 然后按照 2.4 节中的相关步骤标定空间相机 MTF 检测系统光谱响应率. 空间相机 MTF 检测系统光谱响应率标定结果如图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 该相机工作波段为可见光波段, 在 400—700 nm, 光谱响应率峰值在 570 nm 附近.

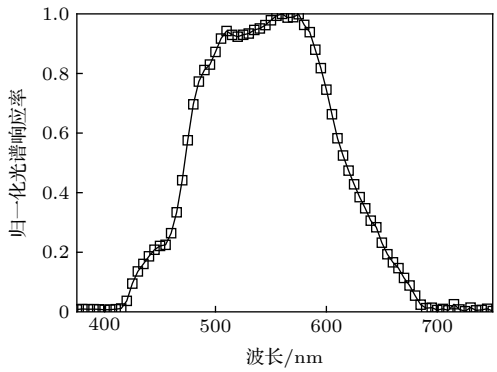

图 4 空间相机 MTF 检测系统光谱响应标定结果

Fig. 4. Calibration results of the spectral response of the space camera MTF measurement system.

3.1.2 光源光谱特性标定

根据公式 (12) 可知, 光源的输出光谱相当于计算 MTF 时各单色 PSF 的叠加系数. 因此, 采用不同的光源会得到不同的 MTF 检测结果, 这正是本文重点研究的内容. 为验证光源光谱特性对 MTF 检测结果的影响程度, 选用 Labsphere 卤钨灯光源和氙灯光源各一台, 并采用光谱辐射度计标定其光谱特性. 此外, 查阅了 Thorlabs 宽带卤素光纤照明光源、稳定型红外钨光源和稳定型卤钨光源的光谱输出数据. 前述光源的输出光谱如图 5 所示, 从图 5 中可以看出, 在空间相机工作波段范围内, 卤钨灯、宽带卤素光纤照明光源、稳定型红外钨光源和稳定型卤钨光源的光谱辐亮度在短波附近较弱, 向长波方向近似线性增加. 卤钨灯、宽带卤素光纤照明光源和稳定型卤钨光源的谱型相近, 氙灯在空间相机整个工作波段内的光谱辐亮度分布较均匀.

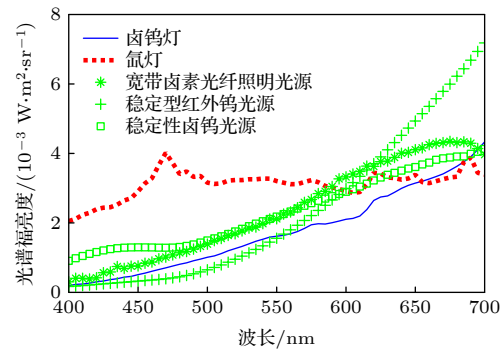

图 5 常用光源光谱特性

Fig. 5. Spectral characteristics of typical light sources.

3.1.3 空间相机光学系统单色 PSF 标定

空间相机光学系统单色 PSF 标定实验中, 平行光管焦面处安装 0.02 mm 直径星点板. 将两个移动方向互相垂直的平移台固定于剪切架上, 构建三维调节装置, 显微测量系统固定于该装置上. 显微测量系统采用 Olympus 显微物镜, 数值孔径为 0.45, 放大倍率为 20 X. 显微测量系统中继镜放大倍率为 1, 采用 Princeton Instruments 的 PIXIS 1024 型探测器采集图像, 像元尺寸为 13 μm. 因此, 显微测量系统所采集图像中单个像元的真实尺寸为 0.65 μm, 据此可以计算空间相机光学系统单色 PSF 的弥散斑直径.

在 400—700 nm 波段, 控制单色仪每隔 5 nm 输出单色光, 按照 2.4 节中的相应步骤标定空间相机光学系统单色 PSF. 图 6 所示为 450, 500, 550, 600, 650 和 700 nm 处空间相机光学系统单色 PSF 的标定结果. 从图 6 可以看出, 该光学系统短波处 PSF 的直径大, 而中长波处 PSF 弥散较小, 存在明显的色差, 这加剧了光源光谱特性对空间相机 MTF 检测结果的影响.

为表征空间相机光学系统各波长处 PSF 的差异, 按文献 [24] 的方法计算空间相机光学系统单色 PSF 的弥散斑直径, 其随波长变化的情况如图 7

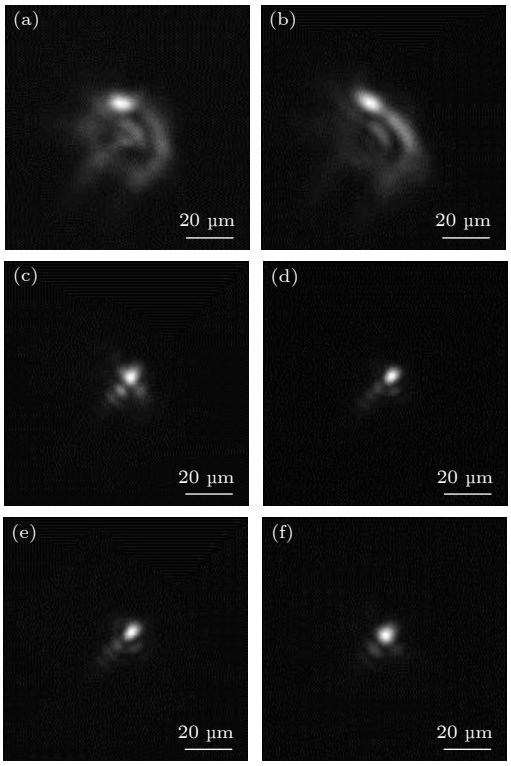

图 6 空间相机光学系统多个波长处的单色 PSF (a) 450 nm; (b) 500 nm; (c) 550 nm; (d) 600 nm; (e) 650 nm; (f) 700 nm

Fig. 6. Monochrome PSF of the optical system of a space camera at: (a) 450 nm; (b) 500 nm; (c) 550 nm; (d) 600 nm; (e) 650 nm; (f) 700 nm.

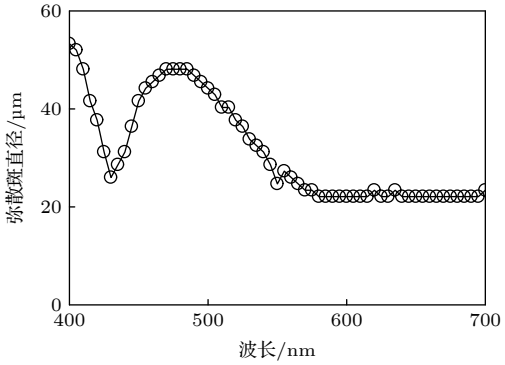

图 7 单色光弥散斑直径随波长变化曲线图

Fig. 7. Diameter of monochrome spot diagrams verse wavelength.

所示. 从图 7 中可以看出, 空间相机光学系统短波端弥散斑直径大且随波长变化大, 说明残余像差较大. 长波端弥散斑直径小且基本一致, 像差校正较好. 前述现象与图 6 所示的趋势一致.

3.2 光源光谱特性对 MTF 检测结果影响的理论计算结果

在完成空间相机 MTF 检测系统光谱响应率、光源光谱特性和单色 PSF 标定后, 可以直接根据公式 (12) 计算采用相应光源时的理论 MTF. 为方便计算, 对公式 (12) 进行整理, 得到

$$\mathrm{MTF}=\left|\mathrm{FT}\left\{\mathrm{comb}\left(u,v\right)\times\left[\mathrm{rect}\left(u,v\right)*\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}C_\lambda\times P_\lambda\times\mathrm{PSF}_\lambda\left(u,v\right)\mathrm{d}\lambda\right]\right\}\right|. \tag{15}$$

根据傅里叶变换卷积定理, 有

$$\mathrm{MTF}=\left|\underbrace{\mathrm{sinc}\left(f_u,f_v\right)}_{\text{part1}}\times\underbrace{\mathrm{FT}\left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}C_\lambda\times P_\lambda\times\mathrm{PSF}_\lambda\left(u,v\right)\mathrm{d}\lambda\right]}_{\text{part2}}*\underbrace{\mathrm{comb}\left(f_u,f_v\right)}_{\text{part3}}\right|, \tag{16}$$

式中, part1是二维矩形函数的傅里叶变换, part2为空间相机光学系统复色 PSF 的傅里叶变换, part3为二维梳妆函数的傅里叶变换.

从图 6 可以看出, 空间相机光学系统各单色 PSF 的形状复杂, 难以利用数学表达式进行表达. 因此, 本文采用数值方法计算公式 (16) 中的积分, 利用快速傅里叶变换算法实现傅里叶变换运算:

$$\mathrm{MTF}=\left|\underbrace{\mathrm{sinc}\left(f_u,f_v\right)}_{\text{part1}}\times\underbrace{\mathrm{FFT}\left\{\sum_{i=1}^{n}\left[C_{\lambda_i}\times P_{\lambda_i}\times\mathrm{PSF}_{\lambda_i}\left(u,v\right)\right]\right\}}_{\text{part2}}*\underbrace{\mathrm{comb}\left(f_u,f_v\right)}_{\text{part3}}\right|, \tag{17}$$

式中, FFT表示快速傅里叶变换; i 为光谱响应率标定波长序号, $i=1,2,\cdots,n$; n 为光谱响应率标定波长位置总数.

用不同光源检测空间相机 MTF 时的理论值如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 采用卤钨灯、宽带卤素光纤照明光源和稳定型卤钨光源检测 MTF 时的理论值几乎一致, 采用稳定型红外钨光源检测 MTF 时的理论值则偏高. 而采用氙灯光源检测 MTF 时的理论值明显低于其他光源, 具体表现为在低频段相差较小, 中高频段偏差逐渐增大, 在高频段相对接近.

从图 8 可以看出, 采用卤钨灯、宽带卤素光纤照明光源、稳定型红外钨光源和稳定型卤钨光源检测 MTF 时的理论值相近, 但与采用氙灯检测 MTF 时的理论值偏差较大. 因此, 表 1 给出了采用卤钨灯和氙灯时所得 MTF 在 $f_c/4$, $f_c/2$, $3f_c/4$和 f_c

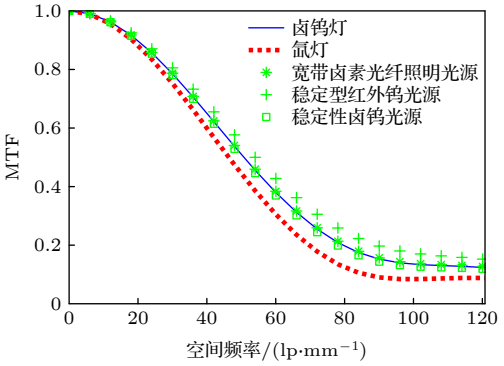

图 8 不同光源对应空间相机 MTF 理论值

Fig. 8. Theoretical values of the space camera MTF corresponding to different light sources.

(f_c为空间相机探测器的 Nyquist 频率, $f_c=1/(2d)$)处的理论值及其偏差, 以对比光源光谱特性对空间相机 MTF 的影响. 从表 1 可以看出, 采用卤钨灯所得 MTF 大于采用氙灯所得 MTF, 二者之间的偏差在中高频处最大, 且最大偏差为 0.075, 在 $f_c/2$ 处. 表 1 相应数据表明, 采用卤钨灯和氙灯检测 MTF 时, 二者所得 MTF 存在较大偏差, 光源光谱特性对 MTF 检测结果的影响不容忽视.

表 1 卤钨灯和氙灯所得 MTF 理论值及其偏差

Table 1. Theoretical values and its deviation between the MTF measured with a tungsten halogen lamp and a xenon lamp.

光源	不同空间频率处的MTF			
	$f_c/4$	$f_c/2$	$3f_c/4$	f_c
卤钨灯	0.784	0.377	0.153	0.124
氙灯	0.750	0.302	0.091	0.089
卤钨灯与氙灯间MTF偏差	0.033	**0.075**	0.062	0.036

3.3 光源光谱特性对 MTF 检测结果影响的实验验证

为验证本文方法的有效性, 特进行实验. 正如第 1 节所述, 倾斜刃边法相较于狭缝法、矩形靶法具有一定优势. 因此, 采用倾斜刃边法来检测空间相机的 MTF. 所用实验装置与 3.1.1 节中光谱响应率标定时的设备相同. 平行光管焦面处安装刀口靶. Cannon EOS 5D SR 相机 ISO 设置为 1000, 快门为 2000. 开始实验前, 调整空间相机位置, 使其所成刀口像中心与探测器中心重合. 旋转刀口靶, 使其与空间相机探测器列方向成一微小夹角. 分别用卤钨灯和氙灯作为光源, 采集对应的刀口图像. 实验中所采集刀口图像如图 9 所示.

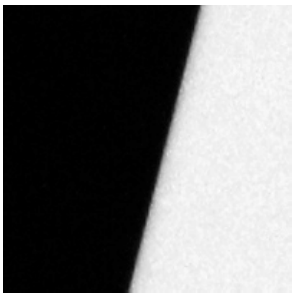

图 9 实验采集的刀口靶图像

Fig. 9. Knife-edge image captured in the experiment.

利用倾斜刃边法处理实验中所采集刀口图像, 得到卤钨灯和氙灯作为光源时空间相机 MTF 的检测结果 (图 10). 从图 10 可以看出, 在全频段内, 采用卤钨灯光源时所得 MTF 检测结果均大于采用氙灯光源作为光源时所得 MTF 检测结果, 其低频和高频处偏差相对较小, 中高频处二者偏差较大.

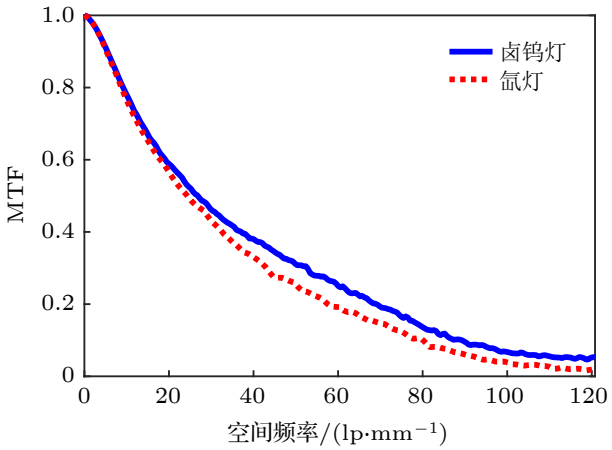

图 10 卤钨灯和氙灯光源 MTF 检测结果

Fig. 10. MTF measurement results with a tungsten halogen lamp and a xenon lamp.

为量化对比光源光谱特性对空间相机 MTF 的影响, 表 2 给出了采用卤钨灯和氙灯检测 MTF 时在 $f_c/4$, $f_c/2$, $3f_c/4$ 和 f_c 处的检测结果及其偏差. 从表 2 可以看出, 采用卤钨灯和氙灯检测时所得 MTF 在各个频率点处的分布特征及偏差与 3.2 节中的理论计算结果相同, 且最大偏差也在 $f_c/2$ 处, 其大小为 0.057. 但表 2 中的 MTF 检测结果及其偏差均比表 1 中的理论值小.

表 2 卤钨灯和氙灯光源所得 MTF 检测结果及其偏差

Table 2. Test results and its deviation between the MTF measured with slanted-edge method by using a tungsten halogen lamp and a xenon lamp.

光源	不同空间频率处的MTF			
	$f_c/4$	$f_c/2$	$3f_c/4$	f_c
卤钨灯	0.460	0.248	0.091	0.053
氙灯	0.428	0.191	0.058	0.020
卤钨灯与氙灯间MTF偏差	0.032	**0.057**	0.033	0.033

4 讨 论

公式 (17) 给出了检测空间相机 MTF 时, MTF 理论值的计算公式, 其相当于探测器采样 MTF 与复色 PSF 经傅里叶变换得到的 MTF 的乘积. 图 4—图 7 表明, 决定复色 PSF 的空间相机 MTF 检测系统光谱响应率、检测光源的光谱特性以及单色

PSF 等因素均存在差异明显的光谱分布特征, 此为不同光源间 MTF 检测结果差异的本质原因. 从图 5—图 7 可以看出, 空间相机光学系统短波处的像差较差, 长波段的像质良好, 因此可以预见, 当采用短波处能量分布更多的光源检测空间相机 MTF 时, 所得结果将偏低. 图 8 和图 10, 以及表 1 和表 2 的相应结果验证了前述结论. 3.3 节中通过实验所获得的 MTF 数值均比 3.2 节中的理论值低, 这是由于公式 (12) 只考虑了空间相机探测器采样引起的 MTF 下降, 而实际上探测器受感光面填充率、转移残留电荷等因素的影响, 其真实的 MTF 往往偏低[25]. 因此, 对于 MTF 较差的探测器, 应用本文方法时, 需要将探测器的实测 MTF 带入公式 (17) 进行分析.

5 结 论

本文提出了一种分析光源光谱特性对空间相机 MTF 检测结果影响的方法, 将 Sigma 镜头和 Cannon EOS 5DSR 相机组成空间相机, 结合单色仪、光谱辐射度计和平行光管对空间相机光谱响应率进行了标定. 同时, 采用单色仪、平行光管、Sigma 镜头和显微测量系统标定了空间相机光学系统工作波段内的单色 PSF. 利用所提方法及相关标定结果, 计算了采用五种光源检测空间相机 MTF 时的理论值, 发现氙灯和其他四种光源所得 MTF 的偏差较大. 对比采用卤钨灯和氙灯检测 MTF 时的理论值, 发现采用卤钨灯检测时所得 MTF 大于采用氙灯检测时所得到的 MTF, 二者之间的偏差在中高频处较大, 最大偏差为 0.075. 搭建了基于平行光管和空间相机的实验装置, 利用倾斜刃边法获取分别采用卤钨灯和氙灯作为光源时的 MTF, 采用卤钨灯检测时所得 MTF 大于采用氙灯检测时所得 MTF, 二者之间的偏差在中高频处较大, 且最大偏差为 0.057, 与理论分析结果接近. 研究结果表明, 光源光谱特性对空间相机 MTF 检测的影响不可忽略, 而本文所提方法能够对其进行准确计算. 同时, 卤钨灯和氙灯作为光源时所得 MTF 理论值及其偏差均大于实验所得结果, 此为空间相机探测器感光面填充率和转移残留电荷等因素降低其 MTF 所致. 为提高理论计算的精度, 需要在本文方法计算模型中融合这些因素. 此外, 需要注意的是, 本文方法主要适用于全色相机或多光谱相机, 而对于较高光谱分辨率相机, 由于其分色手段的复杂性和多样性, 需要根据具体成像原理推导光源光谱特性对 MTF 检测的影响.

参考文献

[1] Lü N G 2011 *Fourier Optics* (2nd Ed.) (Beijing: China Machine Press) pp50–52 (in Chinese) [吕乃光 2011 傅里叶光学(第2版)(北京: 机械工业出版社) 第50—52页]

[2] Xie X F, Fan H D, Wang A D, Zou N Y, Zhang Y C 2018 *Appl. Opt.* **57** 6552

[3] Kenichiro M 2019 *Opt. Express* **27** 1345

[4] Jeffrey T O, Richard L E, Eddie L J 2007 *Opt. Eng.* **46** 16403

[5] Zhou Z X, Gao F, Zhao H J, Zhang L X, Ren L Q, Li Z, Muhammad U G, Liu H 2014 *Opt. Express* **22** 2244

[6] Fang Y C, Tsay H L, Huang G Y 2014 *Appl. Opt.* **53** 195

[7] ISO Standard 15529 2015 *Optics and Photonics-Optical Transfer Function-Principles of Measurement of Modulation Transfer Function (MTF) of Sampled Imaging Systems*

[8] Glenn D B, Sidney Y 1995 *Appl. Opt.* **34** 8050

[9] David N S, James S G, Regina K F 1995 *Appl. Opt.* **34** 746

[10] Lü H Y, Xue X C, Zhao Y L, Han C S 2015 *Opt. Prec. Eng.* **23** 1484 (in Chinese) [吕恒毅, 薛旭成, 赵运隆, 韩诚山 2015 光学精密工程 **23** 1484]

[11] Duan Y X, Liu S K, Chen Y Q, Xue X, Zhao J K, Gao L M 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 351 (in Chinese) [段亚轩, 刘尚阔, 陈永权, 薛勋, 赵建科, 高立民 2017 物理学报 **66** 351]

[12] Peter D B 2000 *Proc. IS&T PICS Conf* Portland, USA, January 1, 2000 p135

[13] ISO Standard 12233 2017 *Photography-Electronic Still Picture Imaging-Resolution and Spatial Frequency Responses*

[14] Don W, Peter D B 2014 *IS&T/SPIE Electronic Imaging* San Francisco, USA, February 3, 2014 p901605

[15] Zhou C J, Lü Z X, Chan X B, Li X B 2011 *Spacecraft Recov. Remot. Sens.* **32** 33 (in Chinese) [周川杰, 吕政欣, 产晓冰, 李显斌 2011 航天返回与遥感 **32** 33]

[16] Alexis P T, Jonathan M M 1995 *Opt. Eng.* **34** 1808

[17] Li T C, Feng H J 2009 *Sixth International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition* Yichang, China, October 30, 2009 p74981

[18] Li T C, Feng H J Xu Z H 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 031101

[19] Yuan H F, Guo Y F, Si G L, Li Y F, Qu L X 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 172 (in Chinese) [袁航飞, 郭永飞, 司国良, 李云飞, 曲立新 2015 光学学报 **35** 172]

[20] Duan Y X, Xu S B, Yuan S C, Chen Y Q, Li H G, Da Z S, Gao L M 2018 *Opt. Eng.* **57** 14103

[21] Xie X F, Fan H D, Wang H Y, Wang Z B, Zou N Y 2018 *Appl. Opt.* **57** B83

[22] Kenichiro M, Yamashita T, Nishida Y, Sugawara M 2014 *Opt. Express* **22** 6040

[23] GB/T 30697 2014 *Test Methods of Characteristics for Spaceborne Multispectral Camera with Wide Field of View* (in Chinese) [GB/T 30697 2014 星载大视场多光谱相机性能测试方法]

[24] Li K, Chen Y Q, Zhao J K, Duan Y X, Li Q L, Pan L, Long J B, Zhang H Y 2015 *Opt. Prec. Eng.* **23** 2482 (in Chinese) [李坤, 陈永权, 赵建科, 段亚轩, 李巧玲, 潘亮, 龙江波, 张海洋 2015 光学精密工程 **23** 2482]

[25] Battula T, Georgiev T, Gille J, Sergio G 2018 *J. Electron. Imaging* **27** 13015

Influence of spectral characteristics of light sources on measuring space camera modulation transfer function

Liu Shang-Kuo [1)2)†] Wang Tao [1)] Li Kun [1)] Cao Kun [1)] Zhang Xi-Bin [1)]
Zhou Yan [1)] Zhao Jian-Ke [1)] Yao Bao-Li [1)]

1) (*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences*, *Xi'an* 710119, *china*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

(Received 22 September 2020; revised manuscript received 21 February 2021)

Abstract

Modulation transfer function (MTF) measurement is a major means to evaluate the imaging quality of a space camera. The influence caused by the spectral characteristic of light source on the MTF results is not negligible, because the transmittance and color aberration of optical systems, and quantum efficiency of the space camera detectors are all spectrally related. Thus, MTF results tested by different light sources are different from each other. To address this problem, we propose a method to analyze the influence of spectral characteristics of light sources on measuring the MTF of space cameras. In addition, the devices and methods are designed to calibrate the spectral response and monochrome point spread function (PSF) of space camera. A Sigma lens (focal length: 1000mm, F number: 5.6) and a Cannon EOS 5DSR camera (pixel size: 4.14 μm) are combined into an experimental space camera, whose spectral response is calibrated with a monochromator (Omno30300, NBeT) and a spectral radiometer (FieldSpec, ASD). We calibrate the monochrome PSF of the Sigma lens with the same monochromator and a CCD (PIXIS 1024, Princeton Instruments, pixel size: 13 μm) micro-measuring system (20X objective). During the calibration of spectral response and monochrome PSF, the same collimator (focus: 5000 mm, F number: 10) is used. With using the proposed method and those calibrating data, we compute the theoretical values of the MTF of a space camera measured separately with five different light sources. The results indicate that MTF measured by a xenon lamp is greatly different from those MTFs measured by the other four light sources. Comparisons of those theoretically calculated MTFs, separately, show that the MTF measured by a tungsten halogen lamp is greater than the MTF measured by a xenon lamp at each spatial frequency. The deviation between those two lamps reaches a maximum value of 0.075 in the medium-high frequency zone. Furthermore, in order to verify those theoretical conclusions, a platform including a collimator and the previous space camera is constructed. The MTFs measured by a tungsten halogen lamp and a xenon lamp are computed with the slanted-edge method respectively. The results demonstrate that the distributions and deviations of the MTFs tested by those two lamps are identical to those theoretical results at each spatial frequency, with the maximum deviation being 0.057. The theoretical and experimental results demonstrate that the suggested method can accurately calculate the influence of spectral characteristics of light sources on measuring MTF of space cameras. The proposed method can also be adopted to investigate the influence of spectral characteristics of light sources on MTF of optical systems in the design or test stages.

Keywords: optical test, modulation transfer function, space camera, spectral characteristic of light sources

PACS: 42.87.–d, 42.30.Lr, 42.79.Pw, 06.20.Dk **DOI:** 10.7498/aps.70.20201575

† Corresponding author. E-mail: liushangkuo@opt.ac.cn