

文章编号 1004-924X(2018)12-3012-07

基于月球目标的 FY-2G 在轨调制传递函数评估

陈 林^{1,2*}, 陈海龙³, 张 鹏^{1,2}, 胡秀清^{1,2}

(1. 中国气象局 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081;

2. 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081;

3. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要:调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)是客观评价遥感器光学系统在轨特性的主要指标之一。为了避免使用地面目标评估气象卫星在轨 MTF 时,大气传输对计算结果的影响,研究了使用月球目标来计算其在轨 MTF 的方法。选择由风云二号 G 星扫描辐射计(VISSR)获取的不受大气传输影响的月球目标遥感图像,作为刃边法的输入图像来计算 VISSR 的在轨 MTF,并且根据探测器的不同探元,划分不同的子图像,分别计算其 MTF 特性。实验结果表明,使用月球目标得到的 MTF 结果为 0.320 1,而地球目标由于有大气影响 MTF 结果仅为 0.216 4,月球目标结果明显优于地球目标。且遥感器各探元结果一致性较好,在连续时间内由同一子图像计算的不同探元的 MTF 结果的标准差仅为 0.013 31,表明使用该方法评估的 MTF 具有稳定性。

关键词:月球图像;遥感光学系统;调制传递函数;刃边法

中图分类号:O439 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182612.3012

On-orbit modulation transfer function measurements based on lunar limb for FY-2G

CHEN Lin^{1,2*}, CHEN Hai-long³, ZHANG Peng^{1,2}, HU Xiu-qing^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;*

2. *National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;*

3. *Beijing Institute of Technology School of Optoelectronics, Beijing 100081, China*)

* *Corresponding author, E-mail: chenlin@cma.gov.cn*

Abstract: The modulation transfer function (MTF) is an important indicator that describes the performance of an optical imaging system. To avoid the effect of atmosphere on the measurement readings obtained by the on-orbit MTF on a meteorological satellite, the calculation method considering the lunar limb is investigated. First, we select the moon image obtained by FY-2G/VISSR as the input for the Knife-edge method. Then, we separate the image into sub-images according to different pixels of the detectors. Finally, based on different sets of sub-images, we obtain different results, which can improve the comprehensiveness of the MTF results. The experiments indicate that the re-

收稿日期:2018-01-31;修订日期:2018-03-20.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2018YFB0504900, No. 2018YFB0504901);国家自然科学基金资助项目(No. 41675036)

sult calculated by the Moon image is better than the result from the Earth image, which are 0.320 1 and 0.216 4, respectively. The standard deviation of MTF results from continuous sub-image is 0.013 31, which indicates the stability of performance of the system.

Key words: knife-edge; lunar limb image; remoting optical system; modulation transfer function

1 引 言

遥感光学成像系统的在轨性能主要由其光学特性决定,调制传递函数(Modulation Transfer Function,MTF)是客观评价光学系统在轨特性的主要指标之一,并被应用于表征遥感光学系统的在轨性能^[1],以及遥感图像的质量评估^[2]与退化图像的增强和复原^[3]。由于遥感光学系统所处的特殊太空环境,发展出基于遥感图像处理的 MTF 计算方法,主要包括刃边法、脉冲法、周期靶标法和点源法等^[4-6]。对于地面分辨率较高的商用卫星,可以通过拍摄地面上人工设置的标准靶标作为输入图像,使用刃边法等来计算光学系统的 MTF。对于地面分辨率较低的气象卫星,由于无法拍摄到人工设置的标准靶标,通常使用地球遥感图像中具有高对比度的部分作为刃边法的输入图像来计算其在轨 MTF^[7]。但大气层的存在降低了地球遥感图像的对比度,导致计算结果难以反应光学系统真实的成像性能。

相比地球来说,月球提供了一个以冷空为背景,均匀、具有高对比度并且容易获得的图像目标^[7]。而且月球周围没有大气层的存在,因此使用月球遥感图像作为刃边法的输入图像计算遥感光学系统的在轨 MTF 具有一定的优势。国外研究者使用月球目标计算遥感光学系统的在轨 MTF,在 GOES-9、MODIS 等遥感器的在轨 MTF 评价中取得了较好的应用效果^[7-13]。国内的研究者也在刃边法及遥感光学系统在轨 MTF 的计算方面做了许多工作^[14-15],并研究了在轨 MTF 评价与图像复原方法^[16]、相机平台振动与 MTF 降质的关系^[17]、探测器的非线性响应对 MTF 测量的影响^[18]等。但目前国内在利用月球图像作为刃边法的输入进行遥感光学系统在轨 MTF 评价的研究仍然较少,此方法的应用与遥感器是否能观测到月球图像至关重要。

本文选择由风云二号 G 星扫描辐射计(FY-2G/VISSR)观测到的月球作为目标图像,使用刃

边法计算了 FY-2G/VISSR 可见光波段的在轨 MTF 性能,并将结果与风云二号 E 星相同仪器的结果进行了比较。证明使用月球图像计算 VISSR 的在轨 MTF 具有可行性和稳定性。

2 数据来源

FY-2G 为风云二号静止气象卫星的第 7 颗卫星,其上搭载的扫描辐射计共有 5 个不同波段的通道,包括 1 个可见光通道,4 个红外通道。VISSR 的探测器将目标的辐射通量转换为电压,辐射通量的大小与探测器得到的电压值具有线性关系。可见光通道星下点空间分辨率为 1.25 km,扫描方式为 4 探元并行扫描。红外通道星下点空间分辨率为 5 km,扫描方式为单探元扫描。FY-2G/VISSR 的主要特性如表 1 所示。

表 1 FY-2G/VISSR 的主要特性指标

Tab. 1 Specification of FY-2G/VISSR

Band	Wavelength/ μm	Resolution/km	Dynamic/k
VIS	0.5~0.9	1.25	0~98
IR1	10.3~11.3	5	180~330
IR2	11.5~12.5	5	180~330
IR3	6.3~7.6	5	190~300
IR4	3.5~4.0	5	180~340

VISSR 对地观测视场约为 20° ,月球绕地球公转时,会出现在 VISSR 对地观测的视场内,并和地球一起被遥感器观测到。月球与地球具有一定的相对运动关系,因此 VISSR 在做圆盘扫描时,将会观测到不同月相状态下的月球,同时可以对月球出现在 VISSR 视场内的时间作出精确预报^[19]。首先通过几何计算等方法提前获取月球出现在 VISSR 视场内的时间,然后设定 VISSR 的观测区域,可以得到月球目标的数据信息,FY-2G/VISSR 对月面的分辨率约为 10 km。最后采用图像识别的方式来进行月球图像的自动提取。

实验中为保证月球图像有足够的信噪比,选

取月相为满月或者接近满月时的月球图像作为刃边法的输入图像。

3 MTF 测试方法

以光学系统横向 MTF 为例,刃边法的一般计算过程如下:

假设月球边缘在其垂直方向上辐射通量的变化是一个理想的刃边函数,其数学表达式可以描述为:

$$step(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

该边缘经过遥感光学系统之后,在光学系统的像面上得到的一维辐射分布可以表示为:

$$i(x) = step(x) * h(x), \quad (2)$$

该辐射分布被探测器接收后转换为电压值分布。其中: $i(x)$ 为边缘扩散函数(Edge Spread Function,ESF); $h(x)$ 为被测光学系统的线扩散函数(Line Spread Function,LSF)。

求取边缘扩散函数 $i(x)$ 的一阶微分,可以得到被测光学系统的线扩散函数 $h(x)$:

$$\frac{dESF}{dx} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(u) \frac{d[step(x-u)]}{dx} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} h(u) \delta(x-u) dx = h(x), \quad (3)$$

其中: $\delta(x)$ 为狄拉克函数, $\delta(x)$ 在定义域上的积分等于1。

对线扩散函数 $h(x)$ 进行一维傅里叶变换,可以得到被测光学系统的光学传递函数(OTF),如公式(4)所示,取 OTF 的模即为被测光学系统的调制传递函数(MTF)。

$$MTF = \| FFT[h(x)] \| = \left\| FFT\left(\frac{di(x)}{dx}\right) \right\|. \quad (4)$$

因此,只要能够获得月球目标经过光学系统以后的边缘扩散函数,即月球边缘垂直方向上的电压值分布,即可以通过以上计算过程得到遥感光学系统的 MTF。

从 2015 年 02 月 07 日 06 时 27 分的遥感图像中获得月球目标每个像素的电压值,如图 1 所示,并在月球赤道附近沿月球边缘垂直方向采集多行像素的电压值分布,将数据排列后如图 2 所示。由于月球边缘轮廓为弧形,因此各行电压值分布之间存在横向的离散。需要以刃边交会的位

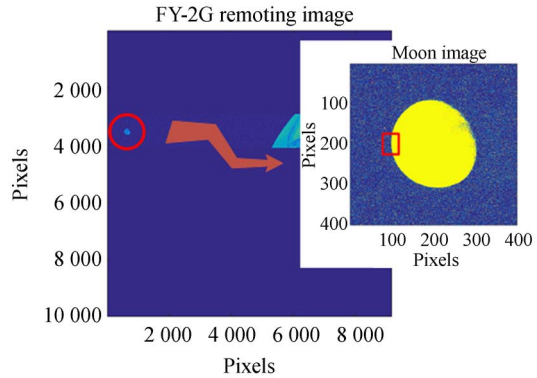


图 1 201502070627 遥感图像

Fig. 1 Remoting image from 201502070627

置为基准,对各行的位置重新进行配准。同时配准的过程间接增加了采样频率,一定程度上解决了数字成像系统采样点不足的问题。为减小月球表面亮度的不均匀性对结果造成的影响,对配准后的各行电压值分布做截断和归一化处理,最终得到月球目标的边缘扩散函数如图 3 所示。

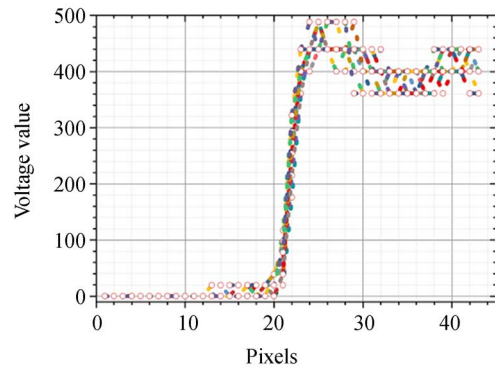


图 2 采样电压值分布

Fig. 2 Sampled voltage data

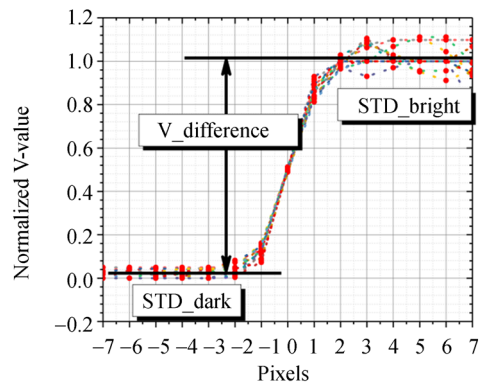


图 3 边缘扩散函数与信噪比(SNR)定义

Fig. 3 ESF and definition of RSN

定义图像的信噪比 (Signal noise ratio, R_{SN})^[8] 为:

$$R_{SN} = \frac{V_difference}{(STD_bright + STD_dark)/2}, \quad (5)$$

其中: $V_difference$ 表示明暗区域电压值 (V) 的差值, STD_bright 和 STD_dark 分别表示明亮区域和黑暗区域电压值的标准差。信噪比越大, 图像质量越好, 根据信噪比筛选图像, 以去除较低的图像信噪比对计算结果可能造成的影响。

为进一步降低图像噪声的影响, 使用费米函数对边缘扩散函数进行拟合, 以获得均匀、归一化的边缘扩散函数^[8]。费米函数的表达式为:

$$f(x) = \frac{a}{e^{(x-b)/c} + 1} + d, \quad (6)$$

其中: a 是缩放因子, b 是曲线弯曲点位置, c 代表边缘的陡峭程度, d 是垂直方向偏移量, 这 4 个参数通过数据拟合得到。拟合后得到的边缘扩散函数如图 4 所示, 为了表征其质量, 用边缘响应 (Edge response Slope, ES) 和相对边缘响应 (Relative Edge Response, RER) 来描述边缘扩散函数的平缓/陡峭程度^[8]。其中:

$$ES = \frac{0.2}{x1_{f(x)=0.6} - x2_{f(x)=0.4}}, \quad (7)$$

$$RER = f(0.5) - f(-0.5). \quad (8)$$

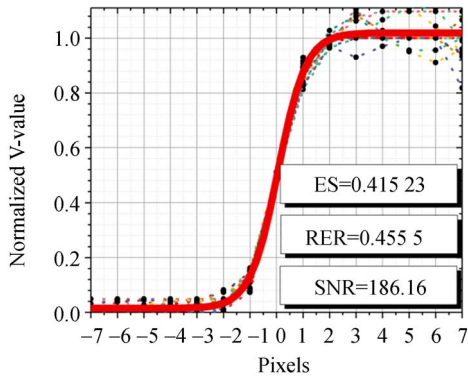


图 4 费米函数拟合边缘扩散函数
Fig. 4 Fitted using Fermi function

根据公式 (5) 和公式 (6), 相对边缘响应 (RER) 反映了边缘扩散函数 (ESF) 的陡峭程度, 而边缘响应 (ER) 则反映了 ESF 的平缓程度, 两者应具有负相关的关系。

对边缘扩散函数做一阶微分后得到的线扩散函数如图 5 所示。其中, FWHM (Full Width at Half Maximum) 表示线扩散函数的半高全宽。

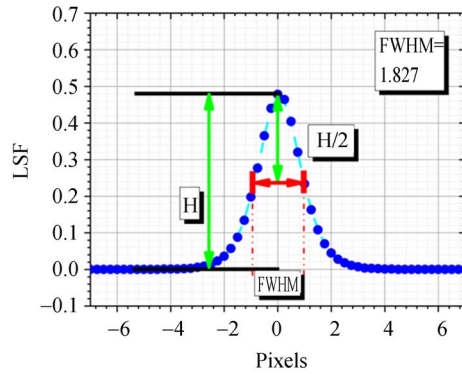


图 5 线扩散函数
Fig. 5 Line spread function

最后对线扩散函数进行一维傅里叶变换, 并取结果的模, 就得到了光学系统的 MTF, 结果如图 6 所示。

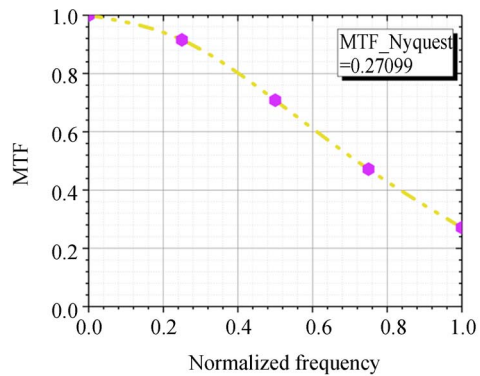


图 6 调制传递函数
Fig. 6 Modulation transfer function

4 实验与结果

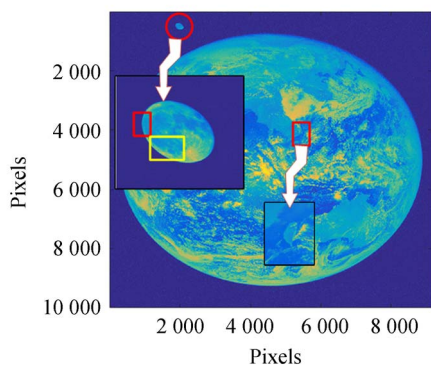
4.1 不同目标图像的结果

地球被大气层包围, 大气传输影响了地物目标遥感图像的清晰度, 而月球目标的遥感图像则不受大气传输的影响。因此使用月球目标计算系统 MTF 具有一定的优势。

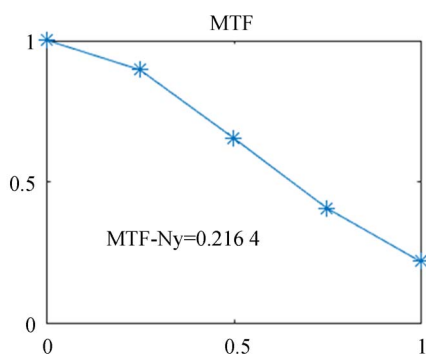
如图 7 所示, 为比较使用不同目标的遥感图像得到的结果的差异性, 在 2015 年 02 月 05 日 06 时 00 分 FY-2G/VISSR 拍摄的遥感图像中, 分别选取地物目标与月球目标作为刃边法的输入图像 (图 7(a)), 计算系统的 MTF。计算结果如图 7(b) 和图 (c) 所示。

FY-2G 可见光的观测像元为 1.25 km, 因此

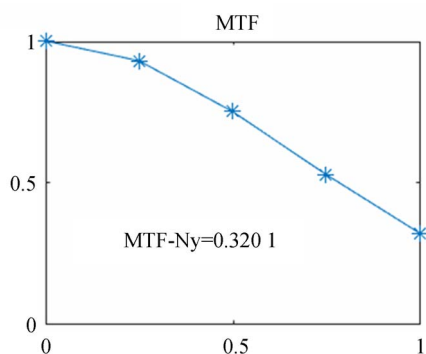
难以利用人工靶标的方法进行 MTF 的测量,常规方法是选择地物目标为晴朗天气条件下的海岸线^[16]。



(a) 不同目标
(a) Targets



(b) 地物目标结果
(b) Result of ground object



(c) 月球目标结果
(c) Result of moon

图 7 不同目标图像的 MTF 结果

Fig. 7 MTF calculated by different targets

从图 7(b)和图(c)中可以看出,根据地物目标计算得到的 MTF 结果为 0.216,低于根据月球目标计算得到的结果。说明地球大气会对遥感图像的清晰度产生影响,从而使得计算的遥感器的光学系统的 MTF 的偏小。而月球目标不受到大气的影响,因此使用无大气的月球作为目标图像,可以更加真实地反映遥感器整个光学系统的 MTF。

4.2 不同探测器单元的结果

线阵探测器中各个探元的响应可能存在微小的差异,对 MTF 的计算结果产生影响。因此将月球目标的遥感图像按行分开,由同一探元扫描获得的图像放在一起,组成新的子图像,并分别进行系统 MTF 的计算。FY-2G/VISSR 的探测器是一个包含 4 个探元的线阵探测器,将月球目标的图像按探元数量分成 4 幅子图像,表 2 给出了根据不同子图像得到的计算结果。

表 2 根据不同子图像得到的 MTF

Tab. 2 MTF calculated by different sub-image

Frequency	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Sub-image 1	1.000 00	0.934 05	0.762 84	0.545 62	0.337 37
Sub-image 2	1.000 00	0.935 61	0.767 50	0.552 12	0.343 30
Sub-image 3	1.000 00	0.933 57	0.761 32	0.543 27	0.334 89
Sub-image 4	1.000 00	0.934 36	0.763 70	0.546 63	0.338 02
Aver	1.000 00	0.934 40	0.763 80	0.546 92	0.338 40
Range	0.000 00	0.002 04	0.006 18	0.008 85	0.008 40
St. D	0.000 00	0.000 87	0.002 63	0.003 75	0.003 54

在不同频率处,分别统计了根据不同子图像计算得到的 MTF 的均值、极差以及标准差。从统计结果可以看出,在不同频率处的 MTF 结果的极差最大值仅为 0.008 85,标准差的最大值仅为 0.003 75,说明根据不同探元获得的子图像得到的计算结果趋于一致,体现了各个探元良好的一致性。

4.3 连续图像的 MTF 结果

根据 FY-2G/VISSR 在 2015 年 02 月 07 日 06 时 27 分至 57 分连续拍摄的 6 幅包含月球目标的遥感图像,统计了连续时间内由同一子图像获得的计算结果。各子图像在截止频率处的 MTF 结果如表 3 所示。

表 3 根据同一子图像得到的 MTF

Tab. 3 MTF calculated by same sub-image

Time	Sub-image			
	1	2	3	4
201502070627	0.337 37	0.343 30	0.334 89	0.338 02
201502070633	0.328 96	0.328 72	0.326 57	0.328 91
201502070639	0.321 53	0.319 35	0.323 28	0.309 86
201502070645	0.331 28	0.332 20	0.332 06	0.312 31
201502070651	0.333 26	0.329 30	0.328 79	0.329 93
201502070657	0.334 58	0.315 59	0.336 77	0.342 58
Aver	0.331 16	0.328 07	0.330 39	0.326 93
Range	0.015 84	0.027 71	0.013 49	0.032 72
St. D	0.005 51	0.009 82	0.005 12	0.013 31

从表 3 中可以看出,在所统计的连续时间内,根据各子图像得到的结果波动最为激烈的是 Sub-image 4,在截止频率处其 MTF 数值的标准差为 0.013 31,其余结果的标准差均在 0.009 82 以内。说明 FY-2G/VISSR 系统的工作性能在短时间内具有稳定性。

参考文献:

- [1] 王治中,张庆君. GF-2 星全色相机在轨 MTF 测量和图像复原研究[J]. 国土资源遥感,2016, 28(04): 93-99.
WANG ZH ZH, ZHANG Q J. On-orbit MTF estimation and restoration of GF-2 satellite image[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2016, 28(4): 93-99. (in Chinese)
- [2] 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(3): 22-27.
DAI Q Y, XIA D SH, HE H Y, *et al.*. Performance analysis of MTF measurement using edge method[J]. *Spacecraft Recovery Sremote Sensing*, 2006(3):22-27. (in Chinese)
- [3] 董建婷,陈伟,史漫丽. 基于刃边法的 MTF 实时测试技术实现[J]. 计算机测量与控制,2013(02): 349-351.
DONG J T, CHEN W, SHI M L. Implementation of MTF real-time test with knife-edge method[J]. *Computer Measurement & Control*, 2013(02):349-351. (in Chinese)

5 结 论

本文选择 FY-2G/VISSR 遥感图像中的月球目标作为原始数据,使用刃边法计算、评价了 FY-2G/VISSR 的在轨 MTF 性能。月球目标的遥感图像不受大气传输的影响,使用其评价 VISSR 的 MTF 性能具有更高的可信度和稳定性。根据探测器不同探元,将月球目标的遥感图像划分为不同的子图像,计算仪器的 MTF 特性,可以更加准确、全面的评价遥感光学系统性能。实验结果表明,使用月球目标得到的 MTF 结果要优于地球目标;不同时间由不同子图像计算的 MTF 结果的标准差小于 0.014,显示出该方法具有较好的稳定性。

对卫星和月球的预报表明,每月风云二号气象卫星都能观测到 1~2 次接近满月的月球目标,未来将在卫星运行的设计寿命期间内,通过对月球观测数据的长时间分析,研究 FY-2G/VISSR 在轨性能的变化趋势,对该系统的工作鲁棒性做更加深入的研究,此外还可以利用月球目标在轨对比评价 FY-2 系列不同卫星的 MTF 特性。

- [4] RAUCHMILLER J R F, SCHOWENGERDT R A. Measurement of the landsat thematic mapper modulation transfer function using an array of point sources [J]. *Optical Engineering*,1988, 27(4).
- [5] 徐伟伟,张黎明,司孝龙,等. 基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨调制传递函数检测[J]. 光学学报,2017,37(7):306-313.
XU W W, ZHANG L M, SI X L, *et al.*. On-orbit modulation transfer function detection of high resolution optical satellite sensor based on reflected point source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 306-313. (in Chinese)
- [6] 徐伟伟,张黎明,杨本永,等. 基于周期靶标的高分辨光学卫星相机在轨 MTF 检测方法[J]. 光学学报. 2011, 31(7):99-104.
XU W W, ZHANG L M, YANG B Y, *et al.*. On-orbit MTF measurement of high resolution satellite optical camera using periodic targets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7):99-104. (in Chinese)
- [7] SHEA J J. Lunar limb knife-edge optical transfer function measurements[J]. *Journal of Electronic Imaging*,1999, 8(2): 196 -208.

- [8] WANG Z P, XIONG X X, CHOI T, *et al.*. On-orbit characterization of MODIS modulation transfer function using the moon[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4112-4121.
- [9] MAHANTI P, HUMM D, STELLING R, *et al.*. In-orbit multi-spectral image sharpness assessment for the lunar reconnaissance orbiter wide angle camera [J]. 2014 *IEEE Aerospace Conference*, 2014:1-8.
- [10] KELLER G R, CHANG T, XIONG X. MTF analysis using lunar observations for Himawari-8/AHI[J]. *Proc. SPIE 10402, Earth Observing Systems XXII*, 104022I. 2017. doi: 10.1117/12.2274091.
- [11] CHOI T, XIONG X X, WANG Z P. On-orbit lunar modulation transfer function measurements for the moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 270-277.
- [12] WANG Z P, XIONG X X, LI Y H. Update of VIIRS on-orbit spatial parameters characterized with the moon[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(10):5486-5494.
- [13] STOREY J C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation[J]. *Proc. SPIE 4540, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites V*, 2001. doi: 10.1117/12.450647 2001.
- [14] 惠雯, 郭强, 吴琼, 等. FY-2G 静止气象卫星遥感图像质量评价[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(5): 1902-1910.
HUI W, GUO Q, WU Q, *et al.*. Image quality evaluation of FY-2G meteorological satellite [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(5): 1902-1910. (in Chinese)
- [15] 许妙忠, 丛铭, 付晓梅, 等. 国产卫星传感器在轨 MTF 检测方法的评价与研究[J]. *测绘科学*. 2014, 39(04): 8-12.
- XU M ZH, CONG M, FU X M, *et al.*. Research and evaluation of on-orbit MTF measurement for Chinese satellite sensor[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(4):8-12. (in Chinese)
- [16] 陈博洋. 基于月球观测的 FY-2G 中波红外波段在轨调制传递函数评价与图像复原[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 430-437.
CHEN B Y. Evaluation of MTF for FY-2G middle infrared band based on moon observation and image restoration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 430-437. (in Chinese)
- [17] 智喜洋, 张树青, 张伟, 等. TDICCD 相机平台振动所致的 MTF 空间移变降质[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1432-1438.
ZHI X Y, ZHANG SH Q, ZHANG W, *et al.*. MTF space-variant blurring resulted from platform vibration of TDICCD camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1432-1438. (in Chinese)
- [18] 李俊霖, 郭永飞, 李静秋, 等. 遥感相机电子学非线性对调制传递函数的影响及其判别[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(11): 3219-3226.
LI J L, GUO Y F, LI J Q, *et al.*. Influence of electronic nonlinearities of space camera on MTF and their discriminant[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3219-3226. (in Chinese)
- [19] 陈林, 张鹏, 吴荣华, 等. 利用月球目标监测风云二号静止气象卫星可见光辐射响应变化[J]. *遥感学报*, 2018, 22(2): 1993-2002.
CHEN L, ZHANG P, WU R H, *et al.*. Monitoring radiometric response change of visible band for FY-2 geostationary meteorological satellite by lunar target[J]. *Journal of Remote Sensing*. 2018, 22(2): 1993-2002. (in Chinese)

作者简介:



陈林(1981—),男,江苏南京人,博士,副研究员,2003年于南京气象学院获取学士学位,2006年于南京信息工程大学获取硕士学位,2009年于中国科学院大气物理研究所获取博士学位。主要从事卫星大气遥感、卫星资料辐射定标预处理方面的研究。E-mail: chenlin@cma.gov.cn.



陈海龙(1994—),男,山东德州人,硕士研究生,2016年于北京理工大学获得学士学位,主要从事图像处理,光学系统设计方面的研究。E-mail: chlaxz@163.com.