

文章编号 1004-924X(2015)07-1838-07

FY-3B/C 中分辨率光谱成像仪在轨初期 传递函数的评价和比较

闵 敏¹, 白 玉², 胡秀清^{1*}, 郭建平³

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

2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

3. 中国气象科学研究院 大气成分研究所, 北京 100081)

摘要:针对极轨气象卫星的特点,提出了利用极地冰雪目标进行风云(FY)卫星中分辨率光谱成像仪(MERSI)传递函数(MTF)测试的刃边方法。该方法沿着冰雪和海洋之间的边缘进行取样,然后将获得的点扩展函数经过傅里叶变换得到最后 Nyquist 频率点处的 MTF 值。该方法能够应用于绝大多数 MERSI 通道。MTF 测试结果表明:在轨初期,FY-3B/C-MERSI 图像在卫星飞行方向的 MTF 结果都在 0.31 左右,图像质量较高,能够满足设计指标。但两颗卫星的 MERSI 传感器图像空间频率特性沿扫描方向都不是很好,1 000 m 分辨率的 FY-3C 图像测试结果集中在 0.12 左右,FY-3B 集中在 0.10 左右,且 FY-3C 星结果系统偏高于 B 星,B 星 250 m 分辨率的测试结果只有 0.07。分析认为导致这种图像频率特征质量在扫描方向严重下降的主要原因是设计 MERSI 时为保证信噪比保留的像元重叠扫描,建议在下一代 FY-3 号气象卫星设计时考虑这种重叠扫描的处理。

关键词:风云-3B/C 中分辨率光谱成像仪;调制传递函数;重叠扫描

中图分类号:P414.4;TP752 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1838

Evaluation and comparison of modulation transfer function for FY-3B/C MERSI on early orbit

MIN Min¹, BAI Yu², HU Xiu-qing^{1*}, GUO Jian-ping³

(1. *Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration (LRCVES/CMA), Beijing 100081, China;*

2. *School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

3. *Institute of Atmospheric Composition, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)*

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

Abstract: In consideration of the characteristics of polar-orbiting satellites, an edge Modulation Transfer Function(MTF) test method using ice and snow targets in polar region is proposed for the China

收稿日期:2015-02-13;**修订日期:**2015-04-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41405035,41471301);公益性行业(气象)科研专项基金资助项目(No. GYHY201406011)

polar-orbit meteorological satellite FengYun (FY) 3-Medium Resolution Spectral Imager (MERSI, 20 bands, with 250 m and 1 000 m resolution). It takes samples from the edge between ice block and sea to get the Point Spread Function (PSF). Then, the Fast Fourier Transform (FFT) method is used to calculate the PSF and retrieve MTF values at the Nyquist frequency point. This method is available to the most of MERSI bands. The experiment results for MTF measurement indicate that the MTFs of all bands along FY-3B/C flight direction are about 0.31 ($>$ design index 0.27/0.25) with high spatial frequency feature quality. However, the spatial frequency feature qualities along MERSI scan direction are bad for both FY-3B and 3C satellites. The MTFs at 1.0 km resolution of FY-3B/C images are respectively approximate 0.10 and 0.12, which also show that the systematic results of FY-3C are higher than that of the FY-3B. The MTFs of FY-3B/MERSI are even just around 0.07 at 250 m resolution. This finding may be primarily attributed to 27% overlapped scanning in the original design of FY-3/MERSI imaging system to enhance the signal-to-noise ratio (SNR) of images. It suggests that the overlapped scanning should be processed in design of the next generation FY-3 atmospheric satellite.

Key words: FY-3B/C Medium Resolution Spectral Imager (MERSI); Modulation Transfer Function (MTF); overlapped scanning

1 引言

卫星图像的空间频率特征是评价在轨卫星传感器图像质量的重要指标^[1-3]。搭载在卫星上的光学系统随着卫星在轨飞行,仪器自身的光学特性、感光表面积分、电荷漫射变化和卫星运动带来的振动等因素会影响仪器的成像质量和清晰度。调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)可有效评价卫星传感器在轨成像质量,特别是 Nyquist 频率处的函数值经常被用来直接评价卫星传感器在轨图像频率特征质量。MTF 是将空间域的点扩展函数(Point Spread Function, PSF)经过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)转化成所需要的频域空间归一化响应值^[1]。

卫星发射前的传感器 MTF 可以在实验室利用特殊的光栅设备等进行精确测量得到。但是卫星传感器在经过火箭发射时的剧烈震动后,整个成像系统需要重新对焦,性能会发生变化。所以,需要重新进行在轨的卫星传感器图像质量评估^[4-6]。卫星在轨 MTF 测试方法主要有点源法、刃边法、脉冲法等。这些方法基于卫星实际观测像元的尺寸,选择适合的地物进行卫星 MTF 测量,被广泛应用到 SPOT、OrbView-3、IKONOS、中巴资源卫星等在轨 MTF 测量^[1,4,7-10]。不过,

这些利用人工地物的 MTF 测试方法在低空间分辨率(100 m 以上)的卫星传感器(例如 MODIS 等)在轨飞行时不易实现。EOS-MODIS 主要采用星上光谱辐射定标装配(Spectro-Radiometric Calibration Assembly, SRCA)来进行定期的在轨图像质量 MTF 测试^[3,11]。最近,Choi and Wang 等^[11-13]还发展了利用冷空扫描视场中的月球图像边缘进行 MTF 计算的新方法。

我国自主研发的风云三号(FY-3)气象卫星是我国的第二代极轨气象卫星,它是在 FY-1 气象卫星技术基础上的发展和提高,能够获取全球、全天候、三维、定量、多光谱的大气、地表、海表特性参数等^[14-16]。自 2008 年起,已经陆续发射了 A、B、C 3 颗卫星,表 1 给出了 3 颗卫星发射和在轨情况。中分辨率光谱成像仪(Medium Resolution Spectral Imager, MERSI)是 FY-3 号极轨气象卫星上搭载的重要仪器,该仪器拥有 20 个通道,波段为 0.40~12.5 μm ,扫描范围 $\pm 55.4^\circ$,对地观测像元分辨率为 0.25~1.0 km^[16-18],如表 2 所示。该仪器具有和 EOS-MODIS 类似的光学通道和观测模式(摆扫式),但并不搭载星上定标器(特别昂贵,且制造工艺复杂),无法进行定期的在轨 MTF 测试。

最近,Min 等^[19]利用晴空条件下极地冰雪目标对 FY-3/MERSI 在轨 MTF 进行了测试。本文在已有方法基础上对其进行完善,对 FY-3B/C-

MERSI 传感器各个通道在轨初期的图像空间频率特性进行了评估和比较,并结合实际的 MTF 结果对 FY-3/MERSI 仪器在轨性能进行评估。

表 1 FY-3A/B/C 发射时间

Tab. 1 FY-3A/B/C launch time

卫星	发射时间	是否在轨
FY-3A	2008 年 5 月 27 日	是
FY-3B	2010 年 11 月 5 日	是
FY-3C	2013 年 9 月 23 日	是

表 2 FY-3/MERSI 通道特征

Tab. 2 FY-3/MERSI specifications

Band Number	Mid-Wavelength (μm)	Band Width (μm)	Spatial Resolution (m)	Dynamic Range
1	0.470	0.05	250	100%
2	0.550	0.05	250	100%
3	0.650	0.05	250	100%
4	0.865	0.05	250	100%
5	11.25	2.5	250	330 K
6	1.640	0.05	1 000	90%
7	2.130	0.05	1 000	90%
8	0.412	0.02	1 000	80%
9	0.443	0.02	1 000	80%
10	0.490	0.02	1 000	80%
11	0.520	0.02	1 000	80%
12	0.565	0.02	1 000	80%
13	0.650	0.02	1 000	80%
14	0.685	0.02	1 000	80%
15	0.765	0.02	1 000	80%
16	0.865	0.02	1 000	80%
17	0.905	0.02	1 000	90%
18	0.940	0.02	1 000	90%
19	0.980	0.02	1 000	90%
20	1.030	0.02	1 000	90%

2 理论方法和数据

2.1 基于冰雪目标的刃边算法

卫星图像的 MTF 是在频率域空间的光学传递系统函数归一化响应。频率域空间光学系统传递函数主要通过图像的 PSF 经过 FFT 获得。整个系统的 PSF 受多个条件的影响,系统的 PSF 为^[1,2]:

$$PSF = PSF_{opt} \cdot PSF_{det} \cdot PSF_{motion} \cdot PSF_{elect}, \quad (1)$$

其中, PSF_{opt} 为光学系统原件的点扩散函数, PSF_{det} 为探测器原件的点扩散函数, PSF_{motion} 为运动和振动作用带来的点扩散函数, PSF_{elect} 为电子作用点扩散函数。则最后的 MTF 为经过点扩散函数微分变形的线扩展函数 (Line Spread Function, LSF) 的傅里叶变换形式:

$$MTF = FFT(LSF), \quad (2)$$

其中, FFT 代表快速傅里叶变换函数,最后的 MTF 值为 Nyquist 频率点处的结果。

图 1 所示为 FY-3B/MERSI 在 2010 年 11 月 28 日在卫星飞行方向上的冰雪边缘目标图像。左边的大图代表第一通道 DN (Digital Number) 值的灰度图。其中,红色框代表的是 MTF 测试区域。右边上面的子图是放大后的相关区域,底部的图片代表被选择的用来进行 MTF 测试样本区域,红色圆圈代表 PSF 经过拟合后的实际边缘位置,红色实线代表经过线性拟合的边缘(彩图见期刊电子版)。为了保证测试效果的可靠性,避开卫星图像边缘和大扫描角度的影响,选择的测试样本都在星下点附近。此外,图 1 中极地冰雪海岸线目标的尺度都在 50~100 km 量级(有些更大),且都由冰雪均匀覆盖,满足 1 km 和 250 m 分辨率的 MERSI 图像 MTF 测试的取样要求,一般 MTF 测试取样在 15~20 个像元(15~20 km)左右。从图 1 的 DN 值分布可以看出冰雪和海洋目标反射率存在差异明显,且在可见和近红外波段反射率稳定,适合做 MTF 测试。图 2 所示为 FY-3B/MERSI 个例的第一通道的冰雪边缘扩展函数 (Edge Spread Function, ESF)、线扩展函数 (LSF) 和 MTF 结果。可看出基于冰雪边缘目标的 MTF 算法能够很好地描述图像的空间质量。

2.2 数据介绍

本项研究主要采用 FY-3B/C-MERSI 的 Level 1B 级 (L1b) 卫星数据。所选取的数据集中在极地附近,利用极地冰雪和海洋边界作为算法测试目标。尽管冰雪边缘不是绝对的直线,但在低分辨率卫星传感器视场中能够描述仪器空间采样的质量。

FY-3B 在轨初期的个例是沿卫星飞行方向 2010 年 11 月 28 日 UTC 09:30 图像和沿 MERSI 扫描方向 2010 年 12 月 5 日的 UTC 08:05 图像。FY-3C 在轨初期的个例是沿卫星飞行方向 2013 年 11 月 26 日 UTC 03:25 图像和沿 MERSI 扫描

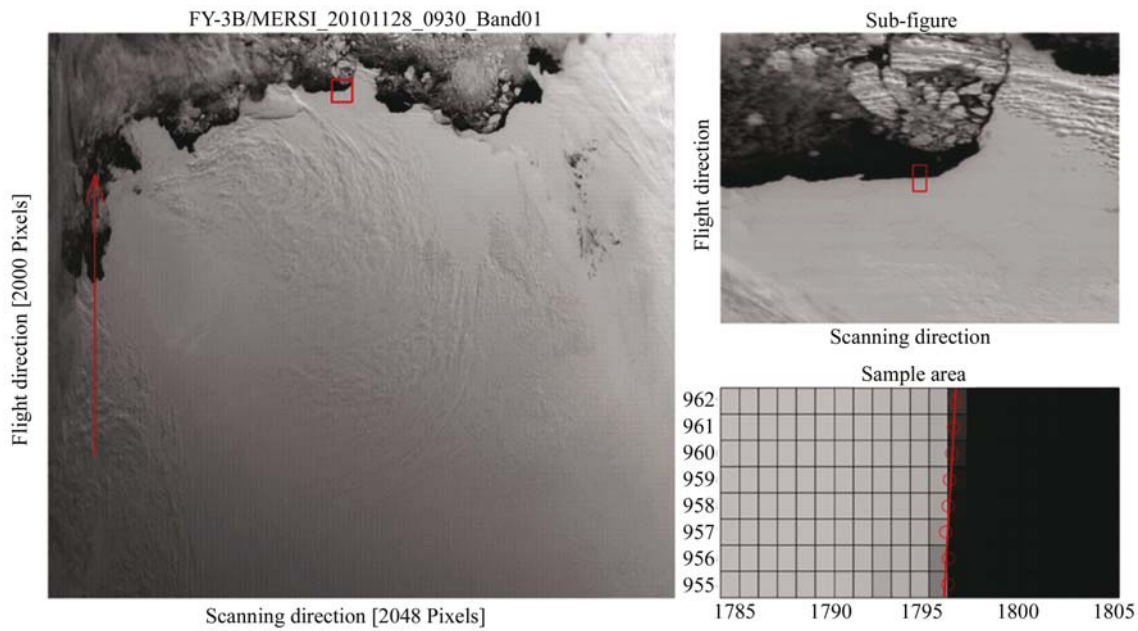


图 1 FY-3B/MERSI 2010 年 11 月 28 日在卫星飞行方向上的冰雪边缘目标图像(1.0 km)
 Fig. 1 Ice edge image at 1.0 km resolution for MTF test at in-track direction from FY-3B/MERSI data on 28 November 2010, UTC 09:30.

方向 2013 年 12 月 29 日的 UTC 10:00 图像。由于 MERSI 第 5 通道是热红外通道,冰雪目标无法进行 MTF 测试。FY-3B/MERSI 的 6、7 通道由于发射后镜头没有打开而没有进行测试;而 FY-3C/MERSI 的 6、7 通道由于条带作用太明显,也没有进行 MTF 测试。MERSI 的 20 通道由于对冰雪目标饱和,也无法进行 MTF 测试。此外,第 8 通道(0.412 μm)由于大气透过率很小,大气作用对该波段影响较大,所以该通道的 MTF 结果供参考(误差非常大)。

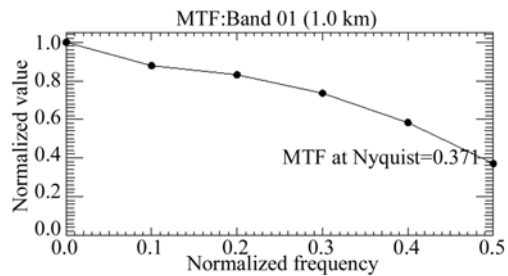
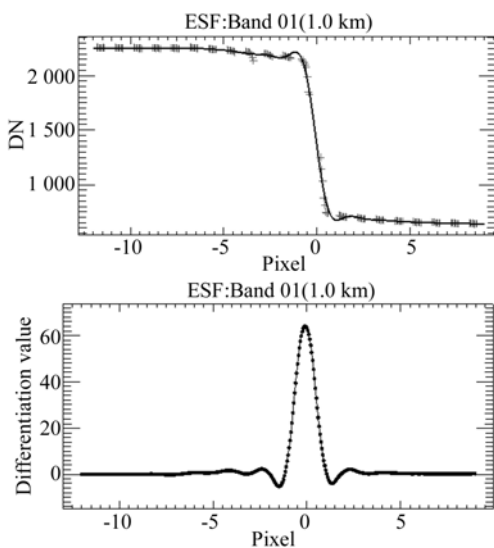


图 2 FY-3B/MERSI 2010 年 11 月 28 日个例第一通道冰雪边缘扩展函数(ESF,上,灰色“+”符号代表观测 DN,黑色实线代表拟合的边缘扩展函数)、线扩展函数(LSF,中)和 MTF(下)结果
 Fig. 2 Ice edge spread function (ESF, upper, gray plus symbols represent DN values observed by MERSI, black solid line represents fitted ESF), line spread function (LSF, middle), and MTF (bottom) figures for FY-3B/MERSI data on 28 November 2010, UTC 09:30.



3 MTF 测试结果和分析

3.1 沿飞行方向结果

图 3 给出了 FY-3B/C-MERSI 的 20 个通道(5,6,7 没有,8 通道仅作参考)沿卫星飞行方向在轨初期 MTF 结果。在不考虑第 8 通道的情况

下, FY-3B/C-MERSI 沿飞行方向各通道在 Nyquist 频率处的 MTF 值都高于设计的设计标准 0.27, 且 FY-3B/C 大部分结果在 0.31 左右, FY-3C 结果偏高于 FY-3B。最大值为 FY-3B/MERSI 第一通道的 0.371, 最小值为 FY-3C/MERSI 第 9 通道 0.274。相比于 Terra-MODIS 的 0.35 (MTF 呈现 14 年内轻微下降趋势)^[6,11,13], FY-3/MERSI 沿飞行方向图像空间频率特性质量较好, 不仅满足设计需求, 还在部分通道和国际先进传感器相当, 尤其是 FY-3B/MERSI 前 4 个通道 MTF 结果都高于 0.35。

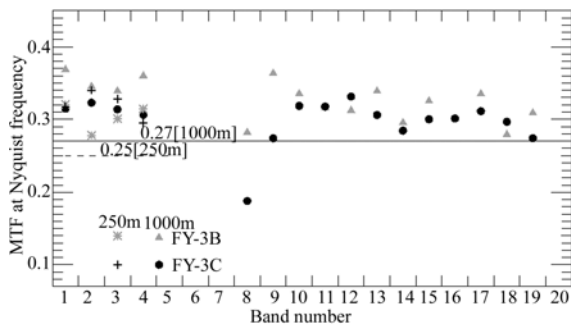


图 3 FY-3B/C-MERSI 沿卫星飞行方向在轨初期 MTF 结果, 实心灰色三角形和黑色圆代表 FY-3B/C-MERSI 1000m 分辨率结果, “*”和“+”符号代表 FY-3B/C-MERSI 250 m 分辨率结果。(灰色代表 FY-3B, 黑色代表 FY-3C, 实线=0.27 代表仪器设计的 1 000 m 分辨率 MTF 指标, 虚线=0.25 代表仪器设计的 250 m 分辨率 MTF 指标)

Fig. 3 Normalized MTF values of FY-3B/C-MERSI on early orbit along satellite flight direction. Solid triangle, solid circle, star, and plus symbols respectively represent the results at 1 000 m and 250 m resolutions. (Gray = FY-3B, Black = FY-3C, solid line = 0.27 represents the design index for 1 000 m resolution image, dash line = 0.25 represents the design index for 250 m resolution image)

此外, 250 m 的结果也都明显高于 0.25 的设计指标, 处于 0.30 左右。两颗卫星沿飞行运动方向的图像质量均满足设计指标。

3.2 沿扫描方向结果

图 4 给出了 FY-3B/C-MERSI 的 20 个通道沿 FY-3/MERSI 扫描方向在轨初期的 MTF 结

果。从 1 000 m 的结果看出, FY-3B/C-MERSI 的 1~4 通道 MTF 分别在 0.16 和 0.13 左右, 且 FY-3C 的结果高于 FY-3B。和 1~4 通道类似, 9~19 通道的 MTF 结果也高于 FY-3B (0.10 左右)。250 m 的结果也一样, FY-3C 在 0.11 左右, FY-3B 的在 0.07 左右。

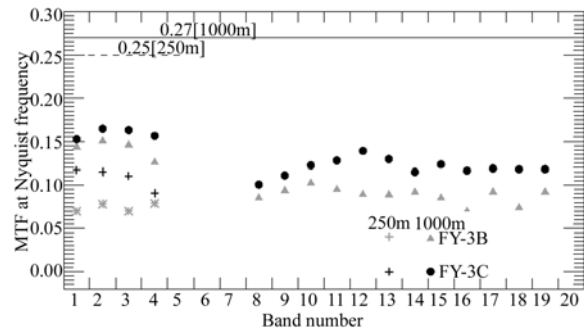


图 4 沿 MERSI 扫描方向的 MTF 结果

Fig. 4 Normalized MTF results along FY-3/MERSI scanning direction

1 000 m 分辨率和 250 m 分辨率的 MERSI 数据 MTF 结果都明显低于原始的设计指标, 直接证明了 FY-3/MERSI 在扫描方向上的图像空间频率特性质量问题, 且 FY-3C 各个通道空间质量都系统性地高于 B 星图像质量(私人交流: 国家卫星气象中心业务服务处室在进行业务服务时, 风云卫星数据用户反馈 FY-3/MERSI 真彩合成图像模糊, 尤其是 B 星图像更加模糊(这个结论与本文测试效果高度吻合))。

3.3 结果分析

从前面的结果分析可知, FY-3B/C-MERSI 传感器所有参加 MTF 测试的通道在 250 m 和 1 000 m 分辨率沿卫星飞行方向都满足最初的仪器在轨成像空间质量设计需求 (0.27@1 000 m, 0.25@250 m), 且均值在 0.31 左右。在经过火箭发射, 仪器开机电流、成像系统重新对焦、卫星飞行震动等因素影响后, 在轨初期 MERSI 稳定后的图像具有较高的空间质量, 和欧美先进对地观测传感器性能接近。这说明经过多年的研发摸索, 我国在卫星传感器制造工艺方面具有了较高的水平。

尽管 C 星比 B 星有明显系统性提高, 但还是比原始设计低了很多。原因是 MERSI 仪器在设计时为了保证信噪比, 在水平扫描时都采用了

27%的像元重叠设计,利用临近像元的信息来弥补单像元信号弱的缺点。图5给出了FY-3/MERSI像元重叠扫描示意图。在MERSI扫描方向,从第二个像元开始(第一个和最后一个像元仅13.5%),每个像元都有27%(每边13.5%)的像元重叠。正是由于这种明显的像元重叠导致了图像空间频率特性的明显下降。飞行方向由于不存在这个问题,MTF测试结果在0.31左右,说

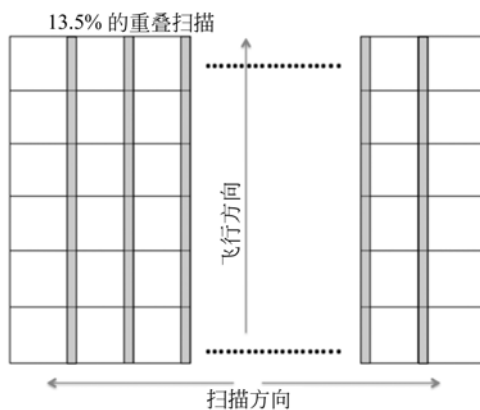


图5 FY-3/MERSI像元重叠扫描示意图(灰色代表13.5%的像元重叠扫描)

Fig. 5 Schematic diagram of overlapped scanning mode of FY-3/MERSI (gray color parts represent overlapped scanning)

明MERSI图像由于重叠扫描在扫描方向严重影响了图像空间频率特性。在目前卫星制造工艺不断提高的背景下,建议在下一代FY-3号极轨气象卫星MERSI传感器设计时去掉这种重叠扫描,以提高图像空间频率特性。

4 结论

本文利用地球极地地区冰雪目标对FY-3B/C-MERSI发射初期各个通道在轨图像空间频率特性进行了MTF测试。测试结果表明:FY-3B/C-MERSI两种分辨率数据图像在卫星飞行方向的MTF结果都在0.31左右,图像较为清晰,和欧美先进仪器图像MTF结果接近,完全满足仪器最初设计的需求。但是,沿MERSI扫描方向1000 m分辨率的FY-3C图像MTF测试结果集中在0.12左右,FY-3B集中在0.10左右,且C星结果系统偏高于B星(B星在250 m分辨率的测试结果更是只有0.07左右),两颗卫星MERSI传感器的图像空间频率特性在扫描方向都不是很好。分析认为导致这种图像质量在扫描方向严重下降的主要因素是MERSI仪器设计时为保证信噪比保留的像元重叠扫描设计。本文研究为下一代FY-3号气象卫星设计提供了参考。

参考文献:

- [1] CHOI T. *IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method* [D]. South Dakota: South Dakota State University, 2002.
- [2] CHOI T, HELDER D. Generic sensor modeling for modulation transfer function (MTF) estimation [J]. *in Proc. Pecora 16 Global Priorities Land Remote Sensing*, 2005: 1-12.
- [3] XIONG X, CHE N, BARNES W L. Terra MODIS on-orbit spatial characterization and performance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(2): 355-365.
- [4] 顾行发, 李小英, 闵祥军, 等. CBERS-02 卫星 CCD 相机 MTF 在轨测量及图像 MTF 补偿[J]. *中国科学*, 2005, 35(增刊 D): 26-40. GU X F, LI X Y, MIN X J, et al.. In flight MTF monitoring and compensation for CCD camera on CBERS-02 [J]. *Science in China*, 2005, 35(Sup-pD): 26-40. (in Chinese)
- [5] KAFRANDJIAN V. A comparisons of the ball, wire, edge, and bar/space pattern techniques for modulation transfer function measurements of linear X-ray detectors [J]. *Journal of X-ray Science and Technology*, 1996, 2: 205-221.
- [6] ROJAS F, SCHOWENGERDT R A, BIGGAR S F. Early results on the characterization of the Terra MODIS spatial response [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 50-61.
- [7] 孟伟, 金龙旭, 李国宁, 等. 调制传递函数在遥感图像复原中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1690-1696. MENG W, JIN L X, LI G N, et al.. Application of MTF in remote sensing image restoration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1690-1696. (in Chinese)

- [8] SCHOWENGERDT R A, ARCHWAMETY C, WEIGLEY R C. Landsat thematic mapper image-derived MTF [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51(9): 1395-1406.
- [9] RAUCHMILLER R F, SCHOWENGERDT R A. Measurement of the Landsat Thematic Mapper MTF using an array of point sources [J]. *Optics Engineer*, 1988, 27(4): 334-343.
- [10] RYANA R, BALDRIDGE B, SCHOWENGERDT R A. IKONOS spatial resolution and image interpretability characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88: 37-52.
- [11] CHOI T, XIONG X, WANG Z. 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, CHOI T, XIONG X. On-orbit modulation transfer function characterization of Terra MODIS using the moon [J]. in *Proc. SPIE*, 2011, 8153: 81531N.
- [13] WANG Z, XIONG X, CHOI T, *et al.*. On-orbit characterization of MODIS modulation transfer function using the moon [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4112-4121.
- [14] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星—风云三号[J]. *气象学报*, 2009, 67(4): 501-509.
- YANG J, DONG CH H, LU N M, *et al.*. FY-3A: the new generation polar-orbiting meteorological satellite of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(4): 501-509.
- [15] YANG J, ZHANG P, LU N, *et al.*. Improvements on global meteorological observations from the current Fengyun 3 satellites and beyond [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2012, 5(4): 251-265.
- [16] YANG Z, LU N, SHI J, *et al.*. Overview of FY-3 payload and ground application system [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4846-4853.
- [17] HU X, SUN L, LIU J, *et al.*. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4915-4928.
- [18] 胡秀清, 张里阳, 郑照军, 等. FY-3A 中分辨率光谱成像仪热红外通道的多探元辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 1972-1980.
- HU X Q, ZHANG L Y, ZHEN ZH J, *et al.*. FY-3A multi-detector radiometric calibration for infrared band medium resolution spectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1972-1980. (in Chinese)
- [19] MIN M, HU X, BAI Y. Performance evaluation for on-orbit modulation transfer function of FengYun-3C Medium Resolution Spectral Imager (MERSI) using polar ice and snow [J]. *Proceeding of SPIE*, 2014, 9264: 92640M.

作者简介:



闵 敏(1982—),男,湖北宜昌人,博士,副研究员,2010年于中国科学院大气物理研究所获得博士学位,主要从事卫星传感器定标和性能评估、云和气溶胶遥感、大气辐射传输方面的研究。E-mail: minmin@cma.gov.cn



胡秀清(1973—),男,湖北黄冈人,研究员,博士,硕士生导师,1996年于南京大学获得学士学位,2004年于北京师范大学获得硕士学位,2012年于中国科学院遥感应用研究所获得博士学位,风云3号极轨气象卫星系统副总师,风云3号MERSI传感器仪器负责人,主要从事卫星光学仪器辐射定标和气溶胶遥感反演等方面的研究。E-mail: huxq@cma.gov.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)