

# 中分辨率光谱成像仪在轨调制传递函数测量方法

郭玲玲 吴泽鹏 赵其昌 马文佳 杨 勇

上海卫星工程研究所, 上海 200240

**摘要** 为了测算中分辨率光谱成像仪在轨调制传递函数(MTF),提出了一种基于图像中非理想阶跃目标的处理方法。利用仅一侧具有较好均匀性的目标,在线扩散函数(LSF)的对称性假设下,实施基于阶跃响应思想的测算方法。与传统的阶跃边缘法相比,该方法得到的结果与中分辨率光谱成像仪获得的结果一致。将其应用中分辨率光谱成像仪的指标考核中,得到的半峰全宽(FWHM)与传统处理方法仅相差0.03 pixel,奈奎斯特频率处的MTF值也仅相差0.02,验证了本文方法的有效性。该方法所利用的目标在中分辨率光谱成像仪遥感图像中极为常见,因而普适性更好。

**关键词** 遥感; 光学遥感; 调制传递函数; 阶跃响应; 中分辨率光谱成像仪

**中图分类号** TP751.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0428002

## On-Orbit Modulation Transfer Function Measurement of Medium Resolution Spectral Imager

Guo Lingling Wu Zepeng Zhao Qichang Ma Wenjia Yang Yong

*Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China*

**Abstract** In order to measure the on-orbit modulation transfer function (MTF) of medium resolution spectral imagers, an approach based on non-ideal step targets is proposed. By using targets with only one uniform side, the proposed method based on the step response is carried on the assumption that the line spread function (LSF) is symmetric. Compared with the traditional step edge method, this method achieves uniform results from the same target captured by a medium resolution spectral imager. The full width at half maximum (FWHM) derived by the proposed method differs from the traditional methods by only 0.03 pixel and the difference of the MTF value at the Nyquist frequency is only 0.02, which verifies the effectiveness of the proposed method. Since the using targets are very common in remote sensing images captured by medium resolution spectral imagers, the proposed method can be applied to more cases than the traditional approaches.

**Key words** remote sensing; optical remote sensing; modulation transfer function; step response; medium resolution spectral imager

**OCIS codes** 280.4788; 120.0280; 110.4100; 300.6190

## 1 引 言

20世纪80年代,为了满足在地球资源调查、环境与气候监测等方面的应用需求,光谱成像技术逐步应用于遥感卫星载荷。在此技术上发展起来的星载中分辨率光谱成像仪能够直接获取地表以及大气中的反射、辐射光谱信息,同时其较宽的刈幅又保证了较广阔的地面覆盖,从而大大提高了空间对地观测能力。国内外典型的中分辨率光谱成像仪有美国EOS-Terra平台的MODIS、欧洲太空局Envisat-1平台的MERIS、中国神舟三号平台的MRIS等。

在卫星研制和使用过程中,离不开对其载荷系统性能的测试与分析。中分辨率光谱成像仪系统的关键

收稿日期: 2015-09-21; 收到修改稿日期: 2015-11-19

作者简介: 郭玲玲(1988—),女,硕士,工程师,主要从事卫星光学相机方面的研究。E-mail: ustcllg@foxmail.com

性能参数包括探测器灵敏度、动态范围、空间分辨率、调制传递函数(MTF)等。其中,MTF是描述成像系统空间特性的重要指标,直接反应了系统对不同空间频率输入的响应情况。在工程应用中,通常仅将奈奎斯特频率处的 MTF 数值作为评价指标,这是由于光电遥感设备可看成低通系统,所以该空间频率下的 MTF 数值大小在一定程度上反映了系统在整个空间频率域的响应优劣<sup>[1]</sup>。中分辨率光谱成像仪在轨时的 MTF 与光学系统、扫描系统、电子学系统、探测器尺寸、在轨环境因素等均有关联<sup>[2-3]</sup>。目前测试光学成像设备在轨 MTF 指标的方法主要有点光源法<sup>[4]</sup>、倾斜刃边法<sup>[5-6]</sup>、倾斜狭缝法<sup>[7]</sup>、周期靶条法<sup>[8]</sup>、辐射状靶标法<sup>[9]</sup>等。为了保证测量精度,高分辨率成像设备通常会使用人工布设的靶标来测算在轨 MTF。而中分辨率光谱成像仪的地面像元分辨力通常在百米量级,导致难以铺设人工靶标,只能从自然景物中选取满足一定形状和特性的目标用于 MTF 分析<sup>[10-11]</sup>。

倾斜刃边法基于阶跃目标的思想已经形成标准 ISO 12233,主要用于 5 m 及更高地面分辨率的光学遥感设备。将该方法移植到中分辨率遥感器的 MTF 分析时,要求图像中包含满足直线分界、均匀辐射面积的目标<sup>[12-14]</sup>,导致在很多情况下,由于捕获的图像中不具备满足条件的目标而无法测算 MTF。本文同样将阶跃目标的思想运用于中分辨率光谱成像仪各通道的在轨 MTF 测量,提出了针对中分辨率光谱成像仪图像,使用非理想阶跃目标时的处理方法。通过对实际遥感图像的实验,验证了该方法的稳定性和有效性。

## 2 问题描述与算法设计

### 2.1 中分辨率光谱成像仪 MTF 分析

中分辨率光谱成像仪采用 45°扫描镜旋转扫描,扫描方向与卫星飞行方向垂直,从而获得二维图像信息。所有的光谱通道共用扫描系统与主光学系统,接收到的光谱能量经分光系统分色,并分别成像于各光谱对应的探测器上,从而获得不同谱段的图像信息。若将每个光谱通道都看成一个线性空间移不变系统,那么每一通道都对应着一个 MTF。定义垂轨方向为 X 向,沿轨方向为 Y 向,假设  $f(x,y)$  为包含地面场景信息的信号输入,  $h(x,y)$  为线性空间移不变系统的单位脉冲响应,也称为点扩展函数,  $g(x,y)$  为成像系统的输出,那么它们之间的关系可以用卷积运算描述,即

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) \quad (1)$$

式中 \* 表示卷积。  $f_{\text{MTF}}(u,v)$  是点扩展函数进行傅里叶变换后的模值,即

$$f_{\text{MTF}}(u,v) = |H(u,v)| \quad (2)$$

式中  $H(u,v)$  为点扩展函数  $h(x,y)$  的二维傅里叶变换。MTF 表征了不同的空间频率信号作为输入时,输出调制度与输入调制度的比值,即系统对各种空间频率输入信号的复现程度。从 MTF 物理含义角度对其测量,受数字采样的影响,需要校直才能准确计算调制度,故而不适用于中分辨率光谱成像仪的 MTF 测算。

### 2.2 基于阶跃响应的 MTF 测试方法分析

根据遥感成像设备获取二维图像信息的方式,通常认为点扩展函数  $h(x,y)$  具有空间可分离性,即  $h(x,y)$  满足如下形式,

$$h(x,y) = h_x(x) \cdot h_y(y) \quad (3)$$

式中  $h_x(x)$ 、 $h_y(y)$  称作线扩散函数(LSF)。根据(2)、(3)式,有

$$f_{\text{MTF}}(u,v) = H_x(u) \cdot H_y(v) \quad (4)$$

式中  $H_x(u)$ 、 $H_y(v)$  分别为  $h_x(x)$ 、 $h_y(y)$  的一维傅里叶变换的模值,即垂轨和沿轨方向的 MTF。由(4)式可知,通过分别测算两个方向的 MTF,可以合成最终的二维 MTF。

以垂轨方向为例,若输入理想阶跃信号

$$f_{\text{step}}(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x \geq 0 \\ 0 & , \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

那么,依据(1)式,其响应为

$$g_{\text{step}}(x) = g_{\text{step}}(x) * h_x(x) = \int_0^{\infty} h_x(x) dx \quad (6)$$

式中  $g_{\text{step}}(x)$  也称作边缘扩散函数(ESF),边缘即对应阶跃。由(6)式可知,若对理想阶跃响应求导,即可还原线

扩散函数,即

$$h_x(x) = \frac{dg_{\text{step}}}{dx}, \quad (7)$$

(7)式表明,可以通过在轨图像中寻找对应地面阶跃输入的区域,通过求其导数来获取线扩散函数。中分辨率光谱成像仪具有较大刈幅,故而图像中经常存在较大区域的海陆交界,海水与陆地形成一个阶跃,图1为某一谱段图像海岸线处形成的阶跃,然而由于近海陆地上目标较复杂,不能够作为理想阶跃目标。

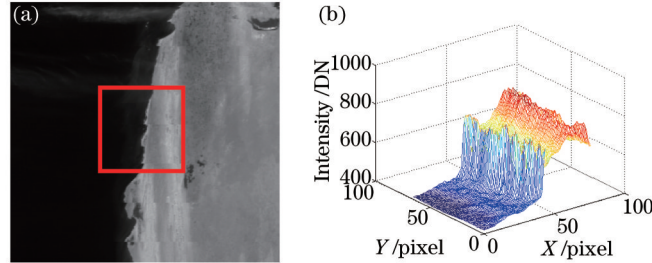


图1 中分辨率光谱成像仪遥感图像中的阶跃。(a) 遥感图像; (b) 海岸处的阶跃

Fig.1 Step captured by medium resolution spectral imager. (a) Remote sensing image; (b) step near the coast

考虑到中分辨率成像系统成像链路的影响,可以近似认为线扩散函数 $h_x(x)$ 、 $h_y(y)$ 具有偶对称性,即

$$\begin{cases} h_x(x) = h_x(-x) \\ h_y(y) = h_y(-y) \end{cases}, \quad (8)$$

那么仅需要一侧的信息就可以利用对称性恢复出完整的线扩散函数。由图1可知,对于海岸线目标,其海水一侧的均匀性较好,可用于计算MTF。

### 2.3 中分辨率光谱成像仪在轨MTF测算流程设计

经过2.1节与2.2节的分析,提出一种中分辨率光谱成像仪在轨MTF测算方法,下面以垂轨方向为例,说明其详细步骤,沿轨方向同理可以实施。

1) 对任一波段,由在轨捕获的光谱图像中,截取垂轨方向阶跃图像(一般为海陆交界处,极地冰面边缘处等),记为 $g_{\text{cross}}(x,y)$ , $x=1,2,\dots,M$ , $y=1,2,\dots,N$ ,其中 $M$ 、 $N$ 分别为所截取图像的列数与行数。

2) 每一行的数据可以看成对ESF的一次采样,对每行ESF首先进行样条插值细化,得到 $g_{\text{cross}}(x,y)$ , $x=1,1+\Delta,1+2\Delta,\dots,M$ , $y=1,2,\dots,N$ ,细化间隔为 $\Delta$ (一般取 $\Delta=0.05$  pixel)。然后对每行数据计算差分,得到 $d_{\text{cross}}(x,y)$ , $x=1+\Delta,1+2\Delta,\dots,M$ , $y=1,2,\dots,N$ 。将差分绝对值最大的位置标记为该行的阶跃跳变位置 $x_{\text{step}}(y)$ , $y=1,2,\dots,N$ 。

3) 令

$$\tilde{d}_{\text{cross}}(x,y) = d_{\text{cross}}[x + x_{\text{step}}(y), y], \quad (9)$$

式中 $x = \max_y \{1 - x_{\text{step}}(y)\}, \max_y \{1 - x_{\text{step}}(y)\} + \Delta, \dots, \min_y \{M - x_{\text{step}}(y)\}$ 。对 $\tilde{d}_{\text{cross}}(x,y)$ 求行均值 $\bar{d}_{\text{cross}}(x)$ 。以 $x=0$ 为中心,将 $\bar{d}_{\text{cross}}(x)$ 中对应均匀性较好的海水一侧偶对称变换,替换原始图像中均匀性较差的一侧,得到线扩散函数 $h_x(x)$ 。

4) 将线扩散函数进行傅里叶变换,得到MTF曲线。

## 3 实验与讨论

### 3.1 方法验证

为了验证本文方法的有效性,利用FY-3C星中分辨率光谱成像仪在轨图像数据,对一形状、均匀性能够满足传统测算方法的目标图像[图2(a)],分别使用传统测算方法<sup>[7]</sup>与本文方法进行对比分析,得到的线扩散函数与MTF曲线分别如图2(b)、(c)所示。

分别统计传统方法与本文方法得到的线扩散函数的半峰全宽(FWHM)值、奈奎斯特频率处的MTF值,结果如表1所列。由图2及表1可知,本文方法计算结果与传统方法相比差异很小,具有很好的一致性,两种方法获得的半峰全宽相差仅0.03 pixel,奈奎斯特频率处的MTF值相差也仅0.02,在测量方法的精度之内。本

文方法与无对称性假设的传统方法所获得的一致处理结果也验证了该方法的有效性。

表1 传统方法与本文方法的计算结果对比

Table 1 Results comparison of conventional method and proposed method

	Conventional	Proposed	Absolute difference
FWHM /pixel	1.35	1.32	0.03
MTF@Nyquist	0.22	0.24	0.02

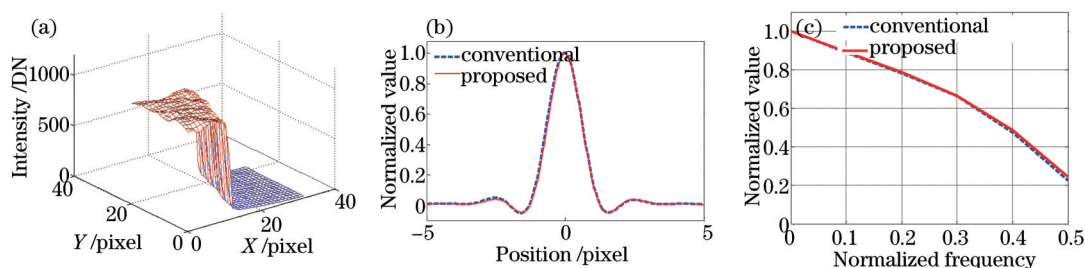


图2 实验结果。(a) 目标; (b) 线扩散函数; (c) MTF 曲线

Fig.2 Experimental results. (a) Target; (b) line spread function; (c) MTF curve

### 3.2 中分辨率光谱成像仪 MTF 评估

在实际中分辨率光谱成像仪所捕获的图像中,满足3.1节中形状与均匀性的自然目标很少,故而传统方法在很多情况下都难以实施。本文方法对目标要求低,而且海洋面积很大,在中分辨率光谱成像仪捕获的遥感图像中很容易找到合适目标。对实际中分辨率光谱成像仪实施在轨 MTF 测算,分别对每一波段实施2.3节所介绍的测算步骤,计算得到的 MTF 曲线,如图3所示。图3中仅列出了具有不同空间分辨率的波段1

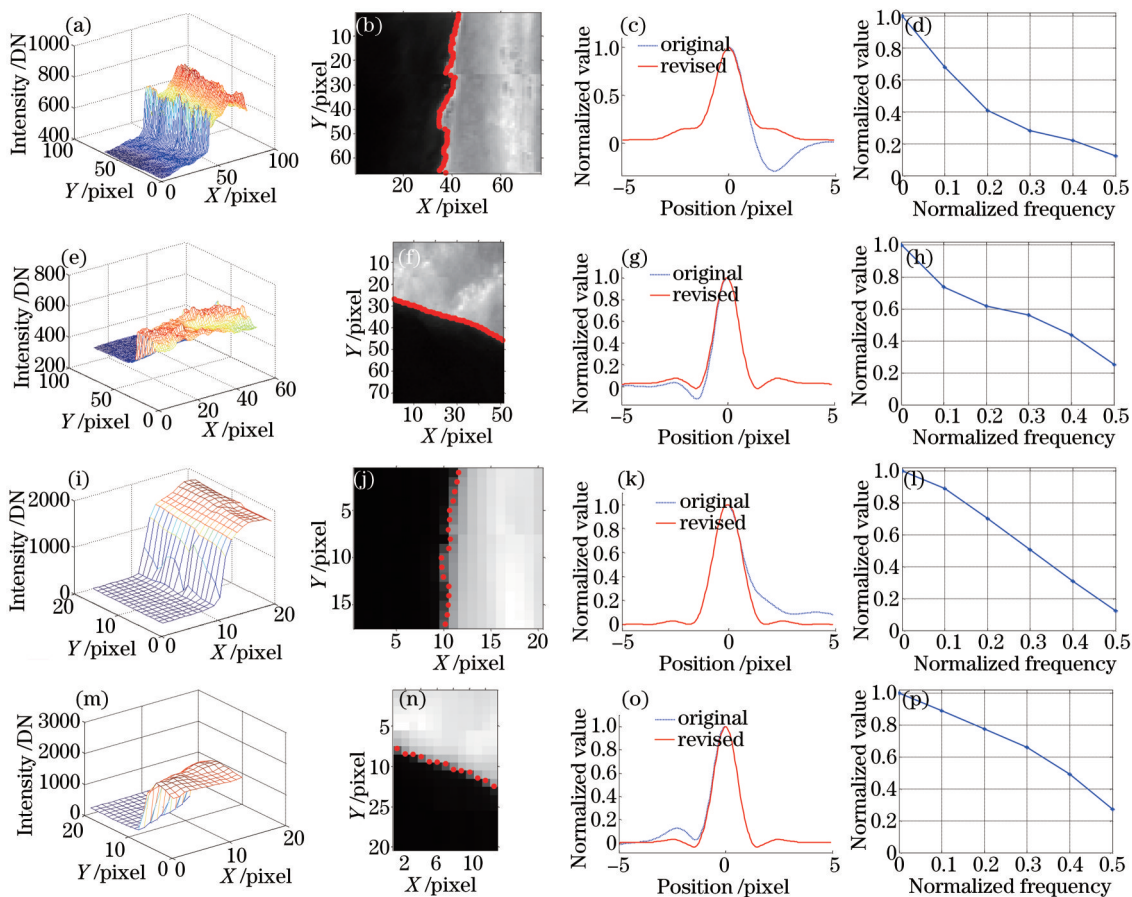


图3 中分辨率光谱成像仪波段1与波段6的 MTF 测算结果

Fig.3 MTF measuring results using data from Band 1 and Band 6 of medium resolution spectral imager

与波段6的测试过程。其中,图3(a)~(d)依次为对应波段1的垂轨目标、检测出的跳变位置、线扩散函数、MTF曲线;图3(e)~(h)、(i)~(l)、(m)~(p)与(a)~(d)表示的内容一致,分别对应波段1沿轨、波段6垂轨、波段6沿轨方向的结果。

对通常较为关注的奈奎斯特频率处的MTF值,统计结果如图4所示。由图4可知,每一波段在垂轨方向的MTF都小于同波段的沿轨方向,垂轨方向20个通道奈奎斯特频率处MTF值分布在0.04~0.15之间,沿轨方向分布在0.13~0.27之间。导致这一现象的根本原因是中分辨率光谱成像仪在成像过程中,扫描方向与卫星飞行方向垂直,所以在最终的图像中,垂轨方向受到较大的像移影响,造成垂轨方向的模糊,降低了该方向的MTF。另外,不同波段在成像过程中,由于分光系统、探测敏感元差异、受水汽影响不同等原因,导致其MTF结果差异也较大。

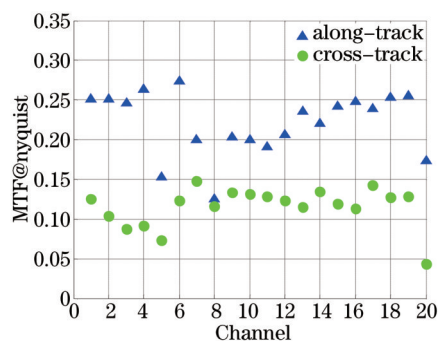


图4 不同波段奈奎斯特频率处的MTF测算结果

Fig.4 MTF measuring results of different bands at Nyquist frequency

## 4 结 论

在阶跃响应思想的基础上,提出了一种使用非理想阶跃目标,测算中分辨率光谱成像仪MTF的方法。利用均匀性较好一侧的线扩散函数数据修正均匀性较差一侧的数据,降低了MTF指标评估时对阶跃目标的要求,故而具有广泛适用性。实验结果表明,在分析同一目标时,本文方法与传统方法得到的半峰全宽相差仅0.03 pixel,奈奎斯特频率处的MTF值相差也仅0.02,具有较好的一致性。同时成功地将本文方法应用于实际中分辨率光谱成像仪不同波段图像的MTF评估,验证了本文方法的有效性和广泛适用性。

## 参 考 文 献

- 1 G C Holst. Imaging system fundamentals[J]. Optical Engineering, 2011, 50(5): 052601.
- 2 Zeng Xuefeng, Zhang Xuejun. Impact of mid-spatial frequency errors in optical manufacturing on modulation transfer function[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 072202.  
曾雪锋, 张学军. 光学制造中频残差对光学调制传递函数的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 072202.
- 3 Wen Changli, Xu Rong, Men Tao, *et al.*. Atmosphere turbulence blurred image restoration based on atmosphere coherent length[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0301002.  
温昌礼, 徐 蓉, 门 涛, 等. 基于大气相干长度的湍流模糊图像复原[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0301002.
- 4 M K Rangaswamy. Quickbird II: Two-dimensional on-orbit modulation transfer function analysis using convex mirror array[D]. South Dakota: South Dakota State University, 2003.
- 5 F Viallefont-Robinet, D Léger. Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3531-3545.
- 6 Sun Chongshang, Wang Qi, Ding Yalin, *et al.*. Modulation transfer function measurement of image motion of aerial camera based on slanted-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1212001.  
孙崇尚, 王 琦, 丁亚林, 等. 基于倾斜刃边法航空相机像移的调制传递函数测量[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1212001.
- 7 T Choi. IKONOS satellite on orbit modulation transfer function (MTF) measurement using edge and pulse method[J]. Master of Science Thesis, South Dakota State University, 2002.
- 8 D N Sitter, J S Goddard, R K Ferrell. Method for the measurement of the modulation transfer function of sampled imaging systems from

- bar-target patterns[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(4): 746-751.
- 9 Guo Shiyi, Mai Ying, Qian Xu, *et al.*. A MTF calculation method of imaging system based on radial target field[J]. *China Sciencepaper*, 2013, 8(4): 287-290.
- 郭世一, 买莹, 钱旭, 等. 一种基于辐射状靶标场的成像系统 MTF 计算方法[J]. *中国科技论文*, 2013, 8(4): 287-290.
- 10 T Choi, X Xiong, Z Wang. 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.
- 11 Min Min, Bai Yu, Hu Xiuqing, *et al.*. Evaluation and comparison of modulation transfer function for FY-3B/C MERSI on early orbit[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1838-1844.
- 闵敏, 白玉, 胡秀清, 等. 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[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1838-1844.
- 12 Guo Lingling, Wu Zepeng, Zhang Liguang, *et al.*. A precise method to measure the on-orbit point spread function of remote sensors[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(3): 284-289.
- 郭玲玲, 吴泽鹏, 张立国, 等. 遥感相机在轨点扩散函数高精度测量方法[J]. *测绘学报*, 2014, 43(3): 284-289.
- 13 Li Jin, Xing Fei, Wang Chong. High-precision on-orbit assessment of MTF for space CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211003.
- 李进, 邢飞, 王翀. 空间 CCD 相机高精度在轨调制传递函数估算[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0211003.
- 14 K Bensebaa, G J F Banon, L M G Fonseca, *et al.*. On-orbit spatial resolution estimation of CBERS-2 imaging system using ideal edge target[J]. *Multimedia Systems & Application*, 2006: 466-475.

栏目编辑: 苏岑