

基于周期靶标的高分辨光学卫星相机在轨 MTF 检测方法

徐伟伟 张黎明 杨本永 陈洪耀

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031
² 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 调制传递函数(MTF)是高空间分辨率光学卫星相机的重要参数之一。提出一种基于周期靶标的直接检测方法,从遥感影像数据计算得到成像系统在奈奎斯特频率处的MTF值,同时利用参数化模型获取全频率的MTF曲线。试验结果表明,在均匀的暗背景上,沿传感器的垂轨方向与顺轨方向上分别布设5组非整像素(地面像元分辨率)间隔的三线靶标,并在大面积靶标的配合下,可直接测得光学卫星相机的MTF值,检测误差优于5%,满足在轨检测的应用要求。

关键词 成像系统; 调制传递函数; 周期靶标; 奈奎斯特频率; 参数化模型

中图分类号 TP79; O435 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0711001

On-Orbit MTF Measurement of High Resolution Satellite Optical Camera Using Periodic Targets

Xu Weiwei Zhang Liming Yang Benyong Chen Hongyao

(¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)
(²Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Modulation transfer function (MTF) is one of the important parameters of high-spatial-resolution satellite optical cameras. A new method for in-flight MTF measurement using periodic targets is presented. It can directly obtain the MTF value at Nyquist frequency and MTF plots by parametric model. The experimental results show that the satellite optical camera's MTF can be directly and accurately acquired by deployment of five groups of non-integer pixel (ground sample distance) interval of three-bar targets in cross and along track directions respectively, and can be arranged with the large-area target in homogenous dark background. The error is less than 5% and the approach can satisfy the application requirements for spaceborne estimation.

Key words imaging systems; modulation transfer function; periodic targets; Nyquist frequency; parametric model

OCIS codes 110.4850; 110.3000; 280.0280

1 引 言

调制传递函数(MTF)是评价光学相机成像质量的重要指标之一,反映了成像系统对不同空间尺度目标的调制传递特性,在目标识别与判读等卫星

遥感数据的应用上具有重要价值。由于受到卫星发射震动、空间环境(大气/真空、温度梯度)变化、运行过程中元器件老化及大气等因素的影响,光学相机的成像质量会发生一定的衰变和退化,故其在轨

收稿日期: 2011-01-07; 收到修改稿日期: 2011-03-07

基金项目: 中国科学院科技创新基金(CXJJ-11-S105)资助课题。

作者简介: 徐伟伟(1983—),男,博士研究生,主要从事光学传感器在轨检测及成像质量分析等方面研究。

E-mail: taiyu555532@gmail.com

导师简介: 张黎明(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学传感器辐射定标与标准传递等方面的研究。

E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

性能不能用发射前实验室检测来替代,需在卫星运行期间对其进行跟踪监测,以便合理、准确并有效地利用卫星遥感数据^[1]。为对光学相机的 MTF 进行在轨检测,国际上发展了诸如刃边法、脉冲法和点源法等多种在轨检测方法,卫星的高空间分辨率传感器大多采用这些方法进行在轨 MTF 检测及性能评价,这些方法各有特点,均取得了一定的在轨检测成效^[2~8]。其中刃边法易于实现,且无需星载传感器的任何参数信息,成为光学相机在轨 MTF 检测的主要方法之一。

这些在轨 MTF 检测方法的共同特点是:通过对特定参照目标的遥感影像求取边扩展函数/线扩展函数/点扩展函数-傅里叶变换等步骤,分析处理得到遥感成像系统的 MTF,易受噪声、方法固有偏差等因素影响^[9]。例如,刃边法 MTF 检测经刃边探测、像素位置配准、边扩展拟合/求导和傅里叶变换等一系列处理步骤得到系统的 MTF,由于刃边本身并不包含多种频率成分,需要通过求导恢复出各个频率,容易受到噪声干扰而降低检测精度,从 (IKONOS) 卫星的高分辨光学相机的 MTF 在轨检测结果来看,该方法在高频即奈奎斯特频率附近的检测精度不高^[10],为此采用参数化模型来抑制噪声^[11,12],但随之带来的问题是模型的准确性,即模型或参数化方法的固有偏差。另外,这些方法中的数值化傅里叶变换也存在一定的误差。为克服这些多步骤数据处理的在轨 MTF 检测方法的缺点,针对星载传感器分辨率检测的周期性方波靶标,提出与大面积靶标相结合的在轨 MTF 直接检测方法,以期提高高空间分辨光学相机 MTF 在轨检测精度。

在轨 MTF 检测与地面实验室测量有很大的不同,本文根据在轨检测的特点,对基于周期靶标的在轨 MTF 检测原理及参数化模型方法进行了论述,设计了在轨 MTF 检测的周期方波靶标,应用该方法对北京一号小卫星的高分辨率相机进行了在轨 MTF 检测试验^[13],并对结果进行了分析和讨论。

2 检测原理

2.1 MTF 与对比度传递函数 (CTF) 的关系

根据 MTF 的定义,当成像系统的检测参照为仅含有某种频率成分的正弦波靶标时,该频率处被测光学相机的 MTF 可表示为像方调制度与物方调制度之比为

$$M(\nu) = \frac{I_{\nu h} - I_{\nu l}}{I_{\nu h} + I_{\nu l}} \bigg/ \frac{I_{0 h} - I_{0 l}}{I_{0 h} + I_{0 l}}, \quad (1)$$

式中 $I_{0 h}$ 、 $I_{0 l}$ 与 $I_{\nu h}$ 、 $I_{\nu l}$ 分别是频率为 ν 的正弦波输入强度与系统响应强度的极大值、极小值。

由于制作正弦波靶标非常困难,而周期性方波靶标容易获取,因此可采用高对比度的反射率靶标,按照某种周期 T 组成的方波靶标来对成像系统的 MTF 进行检测,此时能够直接得到被测光学相机的对比度传递函数 (CTF) 即像方调制度与物方调制度之比为

$$C(\nu) = \frac{d_{\nu h} - d_{\nu l}}{d_{\nu h} + d_{\nu l}} \bigg/ \frac{\rho_h - \rho_l}{\rho_h + \rho_l}, \quad (2)$$

式中频率 $\nu = 1/T$, ρ_h 、 ρ_l 与 $d_{\nu h}$ 、 $d_{\nu l}$ 分别是方波靶标的高低反射率与系统响应值。

虽然 CTF 与 MTF 在形式上类似,但是根据傅里叶级数可知,周期性方波包含多种频率成分,且它们之间存在关系^[14]

$$C(\nu) = \frac{4}{\pi} \left[M(\nu) - \frac{M(3\nu)}{3} + \frac{M(5\nu)}{5} - \frac{M(7\nu)}{7} \dots \right]. \quad (3)$$

从 (3) 式可见,由于 CTF 包含多种频率成分,一般情况下,容易产生频谱混叠现象,不能够得到系统的 MTF 值。对于以线阵 CCD 推扫成像的高分辨率光学卫星相机,根据采样定理,经数字采样所获取的信号不包含小于 2 个 CCD 像素周期的信号成分,即产生频率截止。因此,当设置方波靶标的周期小于 4 个地面采样间隔 (GSD) 时,也就是方波靶标的最小频率大于 0.25 时,CCD 采样信号最多只包含一种频率成分,不产生频率混叠,此时 (3) 式右侧仅有一项。特别在奈奎斯特频率处设置周期性方波靶标,可以求得该频率处的 MTF 值为

$$M(0.5) = \frac{\pi}{4} C(0.5). \quad (4)$$

因此当方波靶标的周期小于 4 个 GSD 时,可以应用周期性方波靶标来替代正弦波靶标进行 MTF 检测,尤其是在轨检测应用时,通常设计周期为 2 个 GSD 的方波靶标,不仅可以检测得到高空间分辨光学卫星相机的地面像元分辨率,而且也能获取其在奈奎斯特频率处的 MTF 值。

2.2 参数化 MTF 模型

所有成像系统进行影像获取时都会产生亮度模糊现象,该模糊化可用点扩展函数准确描述。光学卫星相机主要由光学系统、电子学系统、CCD 探测器等部分组成,基于 Robert A. Schowengerdt 等^[15~17]对系统模型的分析表明,可近似应用高斯模型来描述高分辨星载遥感器的点扩展函数;另外根据相关文献报道,如 IKONOS 卫星高分辨相机的恒

星观测^[18] Quickbird 卫星高分辨光学传感器对地面反射式点光源观测^[19] SPOT 卫星高空间分辨光学相机对主动点光源成像等^[1,6] 点源法在轨 MTF 检测过程中,均采用高斯模型来描述其成像系统的点扩展函数。因此,基于成像系统组成分析及在轨 MTF 检测试验研究表明,高分辨光学卫星相机的点扩展函数可近似用高斯模型来表达为

$$h(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (5)$$

式中 μ 为峰值位置 σ 为标准偏差。

根据高斯函数的特点,其傅里叶变换后仍为高斯函数,若求得某频率的 MTF 值,则可得到其他频率处的 MTF 值,将(5)式作傅里叶变换并归一化可得

$$M(\nu) = \exp(-\nu^2/w^2), \quad (6)$$

式中 w 为模型参数。

由 MTF 与 CTF 的关系分析可知,将周期性方波靶标检测得到的 $M(0.5)$ 代入(6)式可得,顺轨方向的 MTF 为

$$M_x(\nu) = \exp[4\nu^2 \ln M_x(0.5)], \quad (7)$$

同理,在垂轨方向布设周期性靶标,可检测得到垂轨方向的 MTF 为

$$M_y(u) = \exp[4u^2 \ln M_y(0.5)], \quad (8)$$

(6)~(8)式中 ν μ 为两个方向的频率分量。因此,采用周期性方波靶标不仅可以检测得到奈奎斯特频率处的 MTF 值,而且通过参数化模型还可以求得其他频率处的 MTF 值。

2.3 在轨 MTF 检测

在实验室 MTF 检测时,参照靶标与光学相机之间的距离非常近,可忽略大气因素的影响,采用周期性方波参照靶标的反射率或透射率来计算物方调制度为

$$m = \frac{\rho_h - \rho_l}{\rho_h + \rho_l}, \text{ or } m = \frac{t_h - t_l}{t_h + t_l}, \quad (9)$$

式中 t_h t_l 分别为方波靶标的高低透射率。

然而,在轨 MTF 检测时,需要考虑靶标与光学卫星相机之间大气层存在的影响,即大气固有辐射 L_a 以及地-气耦合辐射 L_{a-g} 的影响,不能忽略。由辐射传输理论可知,光学相机在卫星高度处接收的辐亮度为

$$L = L_a + L_{a-g} + tL_t, \quad (10)$$

式中 t 是靶标-传感器路径的大气透射率 L_t 是靶标辐亮度,大气固有辐射及地气耦合辐射可近似为常数。

由此,周期性方波参照靶标的物方调制度可表示为

$$m(0) = \frac{t(L_{0,h} - L_{0,l})}{2(L_a + L_{a-g}) + t(L_{0,h} + L_{0,l})}, \quad (11)$$

式中 $L_{0,h}$ $L_{0,l}$ 分别为方波靶标的高低辐亮度。

显然,方波靶标的物方调制度不仅与靶标的反射率有关,而且也与大气辐射有关。为求得物方调制度,可以采用辐射定标的方法求得各个参数,但考虑到辐射定标将引入一定的误差,本文采用布设大面积靶标(反射率与方波靶标相同)的方法,直接读取大面积靶标图像数据来计算物方调制度。对于线性位移不变系统,可将(11)式的分子分母同乘以光学卫星相机的定标系数得

$$m(0) = \frac{t(L_{0,h} - L_{0,l})}{2(L_a + L_{a-g}) + t(L_{0,h} + L_{0,l})} \approx \frac{d_{1,h} - d_{1,l}}{d_{1,h} + d_{1,l}}, \quad (12)$$

式中 $d_{1,h}$ $d_{1,l}$ 分别为大面积靶标扣除暗电流后的高低响应值。

根据周期性方波靶标的响应值,并结合大面积靶标,可得光学卫星相机在奈奎斯特频率处的 CTF 值,再由 MTF 与 CTF 的关系,求得其在奈奎斯特频率处的 MTF 值,进而利用参数化 MTF 模型获取全频率的 MTF 曲线

$$M(0.5) = \frac{\pi}{4} \frac{d_{b,h} - d_{b,l}}{d_{1,h} - d_{1,l}} \frac{d_{1,h} + d_{1,l}}{d_{b,h} + d_{b,l}}, \quad (13)$$

式中 $d_{b,h}$ $d_{b,l}$ 分别是方波靶标扣除暗电流后的高低响应值。

基于地面布设的相同反射率的大面积靶标及周期性方波靶标,可直接从参照靶标的遥感图像数据,计算得到光学卫星相机在奈奎斯特频率处的 MTF 值。

3 在轨检测试验

作为国际“灾害监测星座(DMC)”的一员,高性能对地观测小卫星“北京一号”搭载的中分辨率遥感器为 32 m 多光谱,幅宽 600 km,高分辨率遥感器为 4 m 全色,幅宽 24 km,卫星具有侧摆功能。为评价其高空间分辨率光学相机的性能及图像质量,2006 年 3 月在合肥进行了在轨 MTF 检测试验,如图 1 所示,分别布设了周期性方波靶标及大面积靶标。

周期性方波靶标共 4 组,分别在遥感器垂轨与顺轨方向上各布设 2 组,每组周期性方波靶标之间的距离分别为 2 m(0.5 个 GSD)与 38 m(9.5 个 GSD),其中方波靶标的辐条宽度均为 4 m(1 个 GSD),长度均为 40 m(10 个 GSD)。另外,由于场地面积有限,大面积靶标在距离约 100 m 的另一场地布设,即在周期性方波靶标遥感影像的下方。

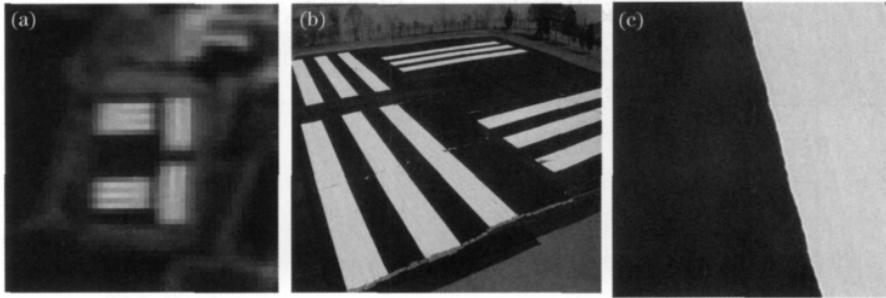


图 1 遥感影像及地面靶标。(a) 影像; (b) 三线靶标; (c) 大面积靶标

Fig. 1 Remote image and target on ground. (a) Image; (b) three-bar target; (c) large-area target

在卫星过顶前后,分别测量周期方波靶标及大面积靶标的反射率,如图 2 所示。在全色相机的响应波段,靶标具有平坦的光谱反射率,将其对光谱响应函数归一化可得,靶标的对比度优于 12。由靶标的卫星遥感影像数据,经统计分析可得,该成像系统在截止频率处的 MTF 值,如图 3 所示,同时利用参数化 MTF 模型可求得该光学卫星相机的 MTF 曲线。

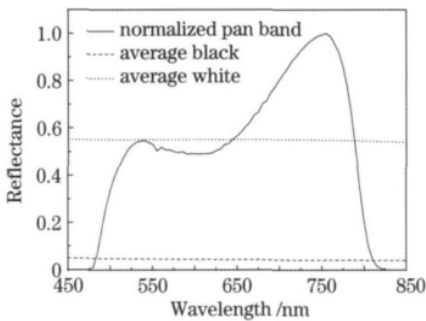


图 2 靶标反射率及归一化光谱响应函数

Fig. 2 Reflectance of tarps and normalized spectral response of detector

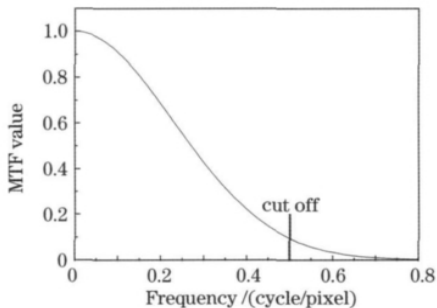


图 3 MTF 曲线

Fig. 3 MTF plot

分辨率检测的周期性方波靶标,在大面积靶标的配合下,不仅能定性判断光学卫星相机的地面像元分辨率,而且能够定量地描述系统在奈奎斯特频率处的 MTF 值。由于利用周期性方波靶标在实验室对光电成像系统进行 MTF 检测时,可以人为地消除采样相位的影响;而在轨 MTF 检测时,不仅要考虑采样相位,同时还要考虑方波靶标周期数及信噪比等因素对 MTF 检测精度的影响。

1) 对于 CTF 与 MTF 关系的分析是在无限长周期靶标的假设下进行的,显然在轨检测应用中,布设无限长周期的方波靶标既不现实也不可能,因此需要确定方波靶标的周期数,以有限的方波周期来替代或逼近无限长周期的方波靶标。经模拟仿真计算及大量的在轨检测试验表明,三线靶标即 3 个周期的方波靶标,如图 1(b) 所示,即可替代无限长周期的方波靶标来对高分辨光学卫星相机进行在轨 MTF 检测。

2) 考虑到周边背景辐射的影响,三线靶标需要有足够的长度,一般情况下靶标两端为 3 pixel,由于混叠有背景辐射而舍弃不用,则至少需靶标长度为 7 pixel。为抑制随机噪声的影响,靶标长度当然越长越好,通常情况下,选择三线靶标辐条长宽比为 10:1,如图 1(b) 所示,此时在长度方向上,对中央为 4 pixel 作统计分析,其信噪比可提高 1 倍,同时根据星载遥感器的动态范围,在轨检测应用时尽可能设置高对比度的三线靶标并将其布设于均匀的暗背景上。另外考虑到临近效应的影响,选择大气干洁的条件下进行在轨检测。

3) 采样相位是指地面参照目标与传感器 CCD 像元的相对位置,这种相对空间状态是不可知的,具有随机性。相对于暗背景的等间隔亮条纹的情况,如三线靶标,若光学传感器的地面 GSD 等于一个亮条纹宽度,则两个极端的采样相位所产生的信号或者具有极大的对比度,或者没有对比度。因此在轨

4 分析讨论

由在轨 MTF 检测试验分析可知,对广泛应用于地球遥感的光电图像传感器和数字图像,利用空间

MTF 检测时,需要按照光学卫星传感器的地面像元分辨率,在需要检测的方向上设置 2 组以上的三线靶标来提高检测精度,当然靶标组数越多,检测精度就越高,如图 4 所示,此时可选择一组最大的调制度值,作为该成像系统在奈奎斯特频率处的 MTF 值。由于场地有限,该试验在检测方向上各布设两组三线靶标,为提高 MTF 检测精度,通过多次试验经统计分析,来确定该光学卫星相机成像系统在奈奎斯特频率处的 MTF 值。但是通常情况下,应在星载遥感器的垂轨与顺轨两个检测方向上分别布设 5 组三线靶标,在轨 MTF 检测误差优于 5%。

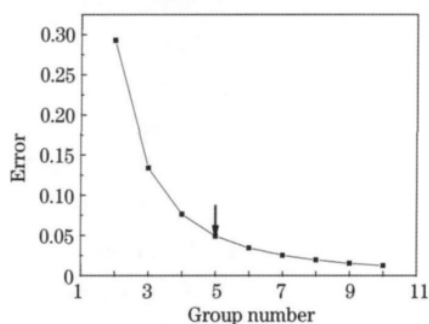


图 4 误差与靶标组数的关系

Fig. 4 Relation of error and group number of the target

初步试验结果表明,针对光学卫星相机空间分辨率检测的三线靶标,在大面积靶标的配合下,可以定量地描述成像系统在奈奎斯特频率处的 MTF 值。从分析可以看出,靶标周期数越多,长度越长,组数越多,在轨 MTF 检测的精度就越高;通常情况下,在遥感器检测方向上布设 5 组长宽比为 10:1 的三线靶标,在轨 MTF 检测的误差优于 5%,能满足高分辨光学卫星相机在轨检测的应用要求。

5 结 论

通过对周期性方波靶标在轨 MTF 检测理论的分析,采用空间分辨率检测的三线靶标与大面积靶标相结合的方式,对北京一号小卫星的高分辨光学相机进行了在轨检测试验。根据遥感影像数据可直接计算得到光学相机在截止频率处的 MTF 值,同时利用参数化模型可推得该成像系统的 MTF 曲线。试验结果表明,在均匀暗背景上,沿检测方向布设 5 组以上高对比度的三线靶标能够得到准确的结果。相对于刃边法、脉冲法等常用的在轨 MTF 检测方法,三线靶标法无需多步骤的数据处理,是一种最直接的在轨 MTF 检测方法,具有较好的直观性。

致谢 感谢童庆禧院士、郑兰芬、张兵、陈正超对项目给予的指导和支。靶标卫星影像由 21 世纪公司提供,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 D. Leger, F. Viallefont, P. Deliot *et al.*. On-orbit MTF assessment of satellite cameras [J]. *Post Launch Calibration of Satellite Sensors*, 2004, 67 ~ 76
- 2 Li Tiesheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2891 ~ 2897
李铁成,陶小平,冯华军等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原 [J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2891 ~ 2897
- 3 T. Choi. IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function Measurement Using Edge and Pulse Method [D]. South Dakota: South Dakota State University, 2002
- 4 Wang Xianhua, Qiao Yanli, Wang Leyi *et al.*. In-flight MTF measurement of satellite-board CCD camera [J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2005, 22(1): 106 ~ 110
王先华,乔延利,王乐意等. 基于小靶标法的星载 CCD 相机 MTF 在轨检测研究 [J]. *量子电子学报*, 2005, 22(1): 106 ~ 110
- 5 Li Tiesheng, Feng Huajun, Xu Zhihai *et al.*. Analytical line spread function fitting model for modulation transfer function calculation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3454 ~ 3459
李铁成,冯华君,徐之海等. 一种可用于调制传递函数计算的新型线扩展函数拟合模型 [J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3454 ~ 3459
- 6 D. Leger, J. Duffaut, F. Robinet. MTF measurement using spotlight [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 4: 2010 ~ 2012
- 7 Li Xianbin, Jiang Xiaoguang, Tang Lingli *et al.*. On-orbit MTF estimation methods for satellite sensors [J]. *Asia-Pacific Space Outlook*, 2007, 2: 38 ~ 43
- 8 Li Hongzhuang, Han Changyuan, Ma Dongmei. Assessment method of modulation transfer function of on-orbit space optical remote sensor using neural network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 631 ~ 637
李宏壮,韩昌元,马冬梅. 航天光学遥感器在轨调制传递函数神经网络评价方法 [J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 631 ~ 637
- 9 T. Choi, D. Helder. Generic sensor modeling for modulation transfer function (MTF) estimation [J]. *South Dakota: Global Priorities in Land Remote Sensing*, 2005
- 10 D. Helder. On-orbit spatial characteristics of IKONOS [C]. *Processing of the 2003 High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop*, 2002
- 11 U. M. Leloglu, E. Tunali. On-orbit modulation transfer function estimation for BiLSAT imagers [C]. *Proc. ISPRS*, 2006, 45 ~ 51
- 12 N. R. Nelson, P. S. Barry. Measurement of Hyperion MTF from on-orbit scenes [C]. *Processings, International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001, VII: 2967 ~ 2969
- 13 Chen Zhengchao. A Research on the Technology of on-Orbit Calibration and Validation of China DMC Microsatellite [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2005
陈正超. 中国 DMC 小卫星在轨测试技术研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2005
- 14 J. W. Coltman. The specification of imaging properties by response to a sine wave input [J]. *J. Opt. Am.*, 1954, 44(6): 468 ~ 471
- 15 R. A. Schowengerdt. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing* [M]. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2007

- 16 J. M. Kenneth. The matphot algorithm for digital point spread function CCD stellar photometry [C]. *SPIE* ,2002 ,**4847**: 207 ~216
- 17 J. Storey. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation [C]. *SPIE* ,2001 ,**4540**: 50 ~61
- 18 H. S. Bowen , G. Dial. IKONOS calculation of MTF using stellar images [OL]. http://ldem.nasa.gov/library/HSRCIW02/MTFCalc_StellarImages_Bowen.pdf
- 19 M. Rangaswamy. Quickbird II Two-Dimensional on-Orbit Modulation Transfer Function Analysis Using Convex Mirror Array [D]. South Dakota: South Dakota State University ,2003