

基于辐射状靶标的高分辨率光学卫星传感器像质评价方法研究

徐伟伟^{1,2*}, 张黎明^{1,2}, 司孝龙^{1,2}, 杨宝云^{1,2}, 王戟翔^{1,2}

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

²中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031

摘要 空间分辨率与调制传递函数(MTF)是高分辨率光学卫星传感器像质评价的重要参数,直接客观反映遥感器成像系统的成像质量。针对空间分辨率检测的辐射状靶标,提出一种与相同反射率大面积靶标相结合的方法,依据靶标调制度、传感器入瞳的物方调制度与像方调制度之间的关系,准确获取不含大气的星载遥感器成像系统在轨 MTF 与大气 MTF 值。实验结果表明:采用辐射状靶标法可同时获取星载遥感器成像系统空间分辨率与在轨 MTF 值,实时的大气 MTF 值为 0.7519,基于辐射状靶标的在轨 MTF 检测结果与刃边法在轨 MTF 检测结果差异小于 5%,该方法可用于实现高分辨率光学卫星传感器在轨像质评价。

关键词 遥感; 像质评价; 辐射状靶标; 调制传递函数; 分辨率

中图分类号 TP79; O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0928003

Image-Quality Evaluation of High-Spatial-Resolution Satellite Optical Sensor Based on Radial Target

Xu Weiwei^{1,2*}, Zhang Liming^{1,2}, Si Xiaolong^{1,2}, Yang Baoyun^{1,2}, Wang Jixiang^{1,2}

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

²Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The spatial resolution and modulation transfer function (MTF) are important parameters for image-quality evaluation of high-spatial-resolution satellite optical sensors. They objectively reflect the imaging quality of a remote-sensing imaging system. We present a method using a radial target for spatial-resolution measurement that employs a large-area target with uniform reflectivity. This method depends on the relationship between the target modulation degree, object modulation degree, and image modulation degree in the pupil of the sensor. It can accurately determine the on-orbit MTF value of a spaceborne remote-sensing imaging system without atmospheric effects as well as the MTF value of the atmosphere. Experimental results show that the proposed radial-target method can simultaneously determine the spatial resolution and the on-orbit MTF value of the spaceborne remote-sensing imaging system. The real-time MTF value of the atmosphere is 0.7519. The difference between the on-orbit MTF value measured by our radial-target method and that measured by the knife-edge method is less than 5%. The proposed method can provide on-orbit image-quality evaluation of high-spatial-resolution satellite optical sensors.

Key words remote sensing; image-quality evaluation; radial target; modulation transfer function; resolution

OCIS codes 280.3420; 110.4850; 110.3000

1 引 言

图像质量是评价光学卫星传感器遥感影像辨别物体能力的重要参数,主要包含空间分辨率和调制传递函数(MTF)。分辨率是决定成像系统图像质

量和目标获取能力的重要参数之一,被认为是能够决定成像系统性能的一种基本度量,暗含着能分辨的最小细节;在轨 MTF 检测主要采用数字傅里叶分析法,即根据物像关系,结合地面目标特性对传感器获取的图像进行数字化处理,得到传感器系统

收稿日期: 2019-03-29; 修回日期: 2019-04-24; 录用日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(41601388)、“十三五”航天预研基金(GFZX0401430407)

* E-mail: weilxu@aiofm.ac.cn

MTF。虽然光学卫星传感器发射前都进行过严格的实验室定标和检测,但是卫星遥感成像与地面成像不同,除了受成像系统影响外,还受卫星发射震动与加速度、在轨运行姿态(如应力释放、排气与调焦)、空间环境(如紫外辐照、温度梯度),以及大气(如湍流和气溶胶)等因素影响。因此,需在卫星遥感传感器全寿命期内对其性能进行定期或不定期的跟踪检测与监测,以保证遥感数据的定量化水平^[1-2]。目前,国内外提出了如周期靶标法、辐射状靶标法等空间分辨率检测方法,以及刃边法、脉冲法、点源法等多种在轨 MTF 检测方法。SPOT 系列、OrbView 系列、WorldView 系列以及资源系列、高分系列等高分辨率光学遥感卫星多采用这些方法进行图像质量评价^[3-11],均取得了一定的在轨检测成效。

在轨图像质量评价是基于光学卫星传感器成像系统的物像关系,利用所获取的图像,结合其在地面选取或设置的参照目标,经分析处理得到系统分辨率及 MTF 等像质评价参数,该方法易受大气及方法固有偏差等因素影响^[12-13]。周期靶标法以高对比度的周期性三线靶标作为参照,配合相同反射率大面积靶标,通过遥感器成像并根据对比度传递函数与 MTF 的关系求得系统 MTF。进行在轨图像质量评价时,需要与地面分辨率参数相配合,通过多组和多次检测方能确定遥感器图像的分辨率与奈奎斯特频率处 MTF 值,周期靶标布设需与轨道精确匹配。该方法易受大气状况影响而产生较大误差^[3]。刃边法采用两块对比度较大且相对均匀的区域以直线边缘相拼接来构成刃边参照目标,通过遥感器成像并对遥感影像处理求取系统 MTF。由于刃边参照目标本身并不包含多种频率成分,需求导恢复出各个频率,多步骤数据处理易受噪声干扰而引入额外误差,进而降低了刃边法在轨 MTF 检测特别是奈奎斯特频率附近的 MTF 检测精度,影响像质评价^[14-16]。脉冲法以均匀暗背景上的高亮线状目标作为参照,通过遥感器成像并对遥感影像处理求取系统 MTF。参照目标的线脉冲在频域内存在零频率点,易受噪声及脉冲目标宽度等因素影响进而降低在轨 MTF 检测精度。点源法以“小”而“亮”的点光源作为参照,通过遥感器成像并根据 MTF 定义求取系统 MTF。在轨 MTF 检测可以获取遥感器成像系统的二维 MTF,但是为抑制随机噪声及采样相位影响,需设置非整数像素间隔的 4×4 点光源阵列来提高检测精度^[8-9]。利用 MTF 检测的点扩展函数的半峰全宽(FWHM)来检测高分辨率光学卫星

传感器成像系统的空间分辨率,该过程包含大气 MTF 的影响从而降低了空间分辨率检测精度^[17]。为克服这些图像质量评价方法的不足,本文针对高分辨率光学卫星传感器空间分辨率检测的辐射状靶标,提出一种与大面积靶标相结合的在轨图像质量评价方法,不仅可以直接检测星载遥感器成像系统的空间分辨率与在轨 MTF 参数,还能直接获取实验场区的大气 MTF 值。

在轨像质评价与地面实验室不同,本文根据高分辨率光学卫星传感器在轨图像质量评价的特点,对基于辐射状靶标的在轨空间分辨率与 MTF 检测原理进行了论述,应用该方法对高分辨率光学卫星传感器进行在轨像质评价实验,获取了不含大气的空间分辨率与 MTF 参数,并对结果进行了分析讨论。

2 检测原理

2.1 空间分辨率

空间分辨率指的是光学卫星传感器能分辨最小空间细节的能力,与光学卫星传感器轨道高度和探测器焦平面像素尺寸成正比,与相机焦距成反比。辐射状靶标是高反射率靶标和低反射率靶标辐条由圆心向外等比扩展形成,在相同半径上具有相同的空间分辨率,同时由于靶标辐射状向外扩展的渐变分辨率和相邻辐条间的相位差异,采用辐射状靶标直观上比较容易辨识出传感器图像的分辨率。

以辐射状靶标为参照,通过测量辐射状靶标图像得到圆心点坐标、可分辨分界点坐标、外边沿点坐标,再结合地面靶标布设参数,依据经验与统计分析可得光学卫星传感器的空间分辨率为

$$R_{es} = \frac{N \left[1 + \frac{\sum \sqrt{(n_i - n_0)^2 + (m_i - m_0)^2}}{M} \right]}{\sum \sqrt{(n_j - n_0)^2 + (m_j - m_0)^2}} \times D_{\max}, \quad (1)$$

式中: R_{es} 为遥感器空间分辨率; $n_i, m_i (i=1, 2, \dots, M)$ 为可分辨分界点坐标; n_0, m_0 为圆心点坐标; $n_j, m_j (j=1, 2, \dots, N)$ 为辐射状靶标图像外边沿点坐标; M (整数)为测得的可分辨分界点的点数, $M \geq 7$; N (整数)为测得的外边沿点坐标的点数, $N \geq 7$; D_{\max} 为靶标设置的最大弦长。

2.2 在轨 MTF

根据 MTF 定义,利用遥感器成像系统对某种频率正弦靶标进行检测时,像方调制与物方调制

度之比即为系统 MTF。由于辐射状靶标的线宽呈梯形连续渐变,弦长每变化一米其半径约增长二十几米,可有效减少相位差等因素影响,因此辐射状靶标是改进的周期靶标,故以辐射状靶标为参照目标可直接检测被测光学卫星传感器系统的对比度传递函数(CTF)。根据傅里叶级数展开与采样定理可知^[3,18],对广泛应用于遥感器、以线阵 CCD 扫描成像的高分辨光电成像系统来说,经数字采样所获的信息不包含小于 2 像素周期的成分,即存在截止频率,在实际在轨检测应用中,辐射状靶标的最小频率大于 1/3 截止频率,遥感成像系统的 MTF 与 CTF 间存在关系:

$$M(\nu) = \frac{\pi}{4}C(\nu), \quad (2)$$

式中, $M(\nu)$ 为遥感器系统 MTF, $C(\nu)$ 为遥感器系统 CTF。

图像质量不仅受光学卫星传感器 MTF 的影响,而且还受包含大气与图像处理等环节的 MTF 的影响,也就是说光学卫星传感器的在轨 MTF 检测与发射前实验室检测不同,需要考虑大气层的影响,即大气程辐射与地气耦合辐射的影响不能忽略。根据辐射传输理论,高分辨率光学卫星传感器入瞳辐亮度主要由三部分组成:目标漫射辐射、程辐射、地气耦合辐射。故遥感器入瞳调制度可表示为

$$m(0) = \frac{t(L_{0,h} - L_{0,l})}{2(L_a + L_{a-g}) + t(L_{0,h} + L_{0,l})}, \quad (3)$$

式中: $m(0)$ 为遥感器入瞳物方调制度; $L_{0,h}$ 、 $L_{0,l}$ 分别为辐射状靶标的高、低辐亮度; t 为靶标-传感器路径大气透过率; L_a 为大气程辐射亮度; L_{a-g} 为地-气耦合辐射亮度。

由此可知,物方调制度不仅包含参照靶标的反射率信息,而且包含大气信息,采用布设反射率与辐射状靶标相同的大面积靶标(对应的遥感器空间频率近似为零)的方法,利用直接读取大面积靶标图像数据的方法来计算遥感器入瞳的物方调制度。通常将遥感成像系统假设为线性位移不变系统,(3)式分子分母同乘以定标系数,得

$$m(0) = \frac{d_{1,h} - d_{1,l}}{d_{1,h} + d_{1,l}}, \quad (4)$$

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

由辐射状靶标图像响应值可得遥感器像方调制度,再结合根据大面积靶标图像数据计算的遥感器入瞳物方调制度,可得不含大气的高分辨率光学卫

星传感器在轨 MTF 为

$$M_s(\nu) = \frac{\pi}{4} \frac{d_{far,h} - d_{far,l}}{d_{1,h} - d_{1,l}} \frac{d_{1,h} + d_{1,l}}{d_{far,h} + d_{far,l}}, \quad (5)$$

式中: $d_{far,h}$ 、 $d_{far,l}$ 分别为扣除暗电流的辐射状靶标图像的高、低响应值; $M_s(\nu)$ 表示不含大气的遥感器在轨 MTF 值。

若将由辐射状靶标图像响应值求得的遥感器像方调制度,与根据地面同步或准同步测量的靶标反射率计算的靶标调制度相结合,可进一步得到含大气的高分辨率光学卫星传感器在轨 MTF 为

$$M_{s-a}(\nu) = \frac{\pi}{4} \frac{d_{far,h} - d_{far,l}}{\rho_h - \rho_l} \frac{\rho_h + \rho_l}{d_{far,h} + d_{far,l}}, \quad (6)$$

式中: ρ_h 、 ρ_l 分别为地面靶标的高、低反射率; $M_{s-a}(\nu)$ 为含大气的遥感器在轨 MTF 值。

根据大面积靶标图像数据计算的遥感器入瞳的物方调制度,再结合根据地面同步或准同步测量的靶标反射率计算的靶标调制度,可得到在轨检测试验场区的大气 MTF 为

$$M_a = \frac{d_{1,h} - d_{1,l}}{\rho_h - \rho_l} \frac{\rho_h + \rho_l}{d_{1,h} + d_{1,l}}, \quad (7)$$

式中 M_a 为场区大气 MTF 值。

3 在轨检测实验

在新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市附近的辐射定标场,2011年7月—8月开展了天绘一号高分辨率光学卫星传感器基于辐射状靶标的成像质量评价实验,如图1所示,分别布设了最大弦长为6.4 m、半径为167 m的辐射状靶标与相同反射率的大面积靶标,辐射状靶标的弦长每变化1 m,其半径约增长26 m,边沿与遥感器飞行方向及其线阵探测器阵列方向夹角约为 10° 。现场准同步测量了辐射状靶标与大面积靶标及实验场的背景反射率,靶标光谱反射率平坦,对光学卫星传感器光谱响应函数进行归

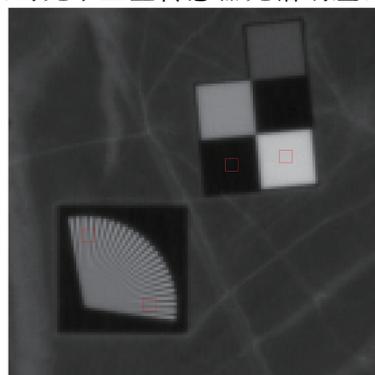


图1 靶标遥感影像

Fig. 1 Remote sensing image of target

一化处理可得靶标的平均反射率为 60.17% 与 4.74% (见图 2), 靶标对比度优于 12, 进而可得地面靶标的调制度为

$$m = \frac{\rho_h - \rho_l}{\rho_h + \rho_l} = 0.8540. \quad (8)$$

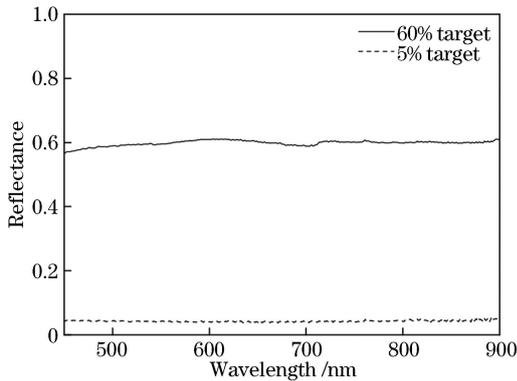


图 2 靶标反射率

Fig. 2 Reflectance of target

基于高分辨率光学卫星传感器获取的辐射状靶标图像, 利用图像中外边沿点与可分辨分界点的线性拟合求得圆心点坐标; 根据从图像上测量选取的垂轨(cross)与沿轨(along)方向的多个可分辨分界点坐标与外边沿点坐标, 结合辐射状靶标的地面布设参数(最大弦长)。利用辐射状靶标法空间分辨率检测软件, 根据(1)式, 计算得到高分辨率光学卫星传感器垂轨与沿轨方向的空间分辨率, 如表 1 所示。

表 1 空间分辨率检测结果

Table 1 Results of spatial resolution measurement

Direction	Spatial resolution / m
Cross	5.09
Along	5.04

利用高分辨率光学卫星传感器获取的大面积靶标图像, 选取高低反射率靶标图像中央区域的响应值, 如表 2 所示, 经统计分析可得高低反射率靶标响应值分别为 856 与 187, 由(4)式可得遥感器入瞳处的物方调制度为

$$m(0) = \frac{d_{1,h} - d_{1,l}}{d_{1,h} + d_{1,l}} = 0.6421. \quad (9)$$

由现场测量求得的地面靶标调制度[(8)式], 结合大面积靶标图像求得的遥感器入瞳的物方调制度[(9)式], 代入(7)式可得大气 MTF 值 $M_a = 0.7519$ 。

根据辐射状靶标图像在沿轨与垂轨方向采用分辨率检测方法测得的可分辨分界点的高低反射率靶标响应值, 如表 3 所示, 经统计分析中央区域 3 pixel ×

表 2 大面积靶标图像响应值

Table 2 Image response values of large-area target

Relative pixel coordinate	Digital number									
	Low reflectance target					High reflectance target				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	190	188	191	189	187	858	847	858	857	859
2	184	189	191	189	186	850	852	852	852	859
3	186	189	191	189	185	853	853	855	853	859
4	184	185	187	185	183	856	856	858	855	859
5	183	184	183	183	183	862	860	860	857	861
Average	187					856				

3 pixel, 计算得到可分辨分界点辐射状靶标图像调制度分别为 0.1675 与 0.1898, 再结合根据大面积靶标响应均值求得的遥感器入瞳物方调制度, 代入(5)式求得不含大气的高分辨率光学卫星传感器在轨 MTF 值 (0.2049 与 0.2322 @ Nyquist Frequency), 如表 4 所示。将辐射状靶标图像可分辨分界点的像方调制度与地面靶标调制度代入(6)式, 可得到包含大气的光学卫星传感器在轨 MTF 值 (0.1540 与 0.1746 @ Nyquist Frequency); 其它频率处 MTF 根据相应空间分辨率处的辐射状靶标响应值与大面积靶标响应值及地面靶标调制度得到。

表 3 辐射状靶标响应值

Table 3 Image response values of radial target

Relative pixel coordinate	Digital number									
	Along-direction					Cross-direction				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	592	445	621	448	598	575	581	593	603	610
2	581	434	605	432	586	390	403	410	422	437
3	569	421	590	422	571	587	599	604	612	624
4	565	412	581	415	569	392	406	411	419	438
5	558	401	569	404	547	576	586	598	601	611

表 4 在轨 MTF 检测结果

Table 4 Results of on-orbit MTF measurement

Category	MTF	
	Cross-direction	Along-direction
Atmospheric	0.7519	
Without atmospheric	0.2322	0.2049
With atmospheric	0.1746	0.1540

4 分析讨论

基于辐射状靶标的高分辨率光学卫星传感器像质评价方法,不仅可以检测遥感器的空间分辨率,而且可以通过结合相同反射率的大面积靶标,分别独立地获取大气 MTF 值和不含大气的传感器在轨 MTF 值。与实验室检测不同,高分辨率光学卫星传感器在轨像质评价不仅要考虑参照目标特性,还要分析大气及传感器成像链路等因素的影响。

辐射状靶标线条数多(数十条以上),可有效避免三线周期性靶标线数少的不足,且辐射状靶标的线宽呈梯度连续渐变,弦长每变化 1 m,其半径也会变长(20 m 以上),能有效减小光电成像系统采样相位差等因素影响,提高在轨成像质量评价精度;此外辐射状靶标辐射角大于 90° 可覆盖光学卫星传感器飞行方向与 CCD 探测器线阵方向的全范围,可用于检测出不同方向的在轨图像质量。高分辨率光学卫星传感器在轨成像质量评价实验期间,同批次的辐射状靶标与大面积靶标均长期布设于野外,相同实验时间内经历相同的环境条件,所引起的靶标微小变化也是相同的,且在卫星过顶成像前后,均进行靶标反射率测试,辐射状靶标与大面积靶标的反射率差异小于 0.5%,可认为场地环境对辐射状靶标与大面积靶标的影响是相同的。

从 MTF 对图像质量的影响来看,光学遥感影像不仅受光学卫星传感器 MTF 的影响,还受大气(湍流、程辐射及地气耦合效应等)与卫星姿态及运动等因素影响。基于辐射状靶标的在轨像质评价方法,采用相同反射率的大面积靶标,获取光学卫星传感器入瞳处的物方调制度,再结合辐射状靶标图像的像方调制度,可以有效克服大气对传感器成像质量的影响,直接获取不含大气的高分辨率光学卫星传感器在轨 MTF;同时将同步或准同步测量的靶标反射率,与大面积靶标图像的调制度结合,可直接获取大气 MTF 值。考虑到场区背景辐射与邻近效应影响,辐射状靶标与大面积靶标均布设于大面积且均匀的暗背景目标场,而且大面积的高低反射率靶标尺寸均优于 $20 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$ (或分辨率),在计算物方调制度时,仅选择中央区域的 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ (或分辨率),以有效抑制随机噪声、背景辐射及邻近效应影响,进而提高高分辨率光学卫星传感器基于辐射状靶标的在轨像质评价精度。

根据大面积靶标所构成的刃边图像,对高分辨率光学卫星传感器采用刃边法进行在轨 MTF 检

测,以验证基于辐射状靶标的在轨像质评价结果。刃边法在轨 MTF 检测主要包含刃边亚像素位置检测与拟合、参数化边扩展函数获取、线扩展函数获取与傅里叶变换等步骤,最终得到系统 MTF,如图 3 所示,基于大面积靶标的高分辨率光学卫星传感器在轨 MTF 检测结果为 0.2425 与 0.2153,与辐射状靶标在轨检测结果的差异为 4.26% 与 4.84%,具有较好的一致性,验证了光学卫星传感器辐射状靶标法在轨像质评价方法的有效性。基于辐射状靶标的高分辨率光学卫星传感器在轨像质评价方法,相对于刃边法来说,是根据空间分辨率与 MTF 定义进行检测的直接方法。

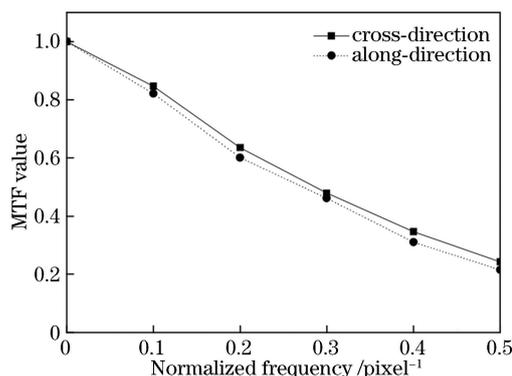


图 3 刃边法测得的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF plots measured by knife-edge method

5 结 论

通过对辐射状靶标法在轨像质评价进行理论分析,开展了基于辐射状靶标的高分辨率光学卫星传感器在轨空间分辨率与 MTF 检测实验,并在相同反射率大面积靶标的配合下,不仅获取了星载遥感器的空间分辨率与在轨 MTF 值,同时还得到了大气 MTF 值。辐射状靶标法在轨 MTF 检测结果与刃边法检测结果差异小于 5%,具有较好的一致性。结合大面积靶标的辐射状靶标法能有效提高高分辨率光学卫星传感器在轨像质评价精度;相对于像素级空间分辨率检测的周期性三线靶标法,辐射状靶标法有效地避免了周期性三线靶标条数、长度和相位差等因素影响,弦长每变化一米其半径约增长二十几米,宽度渐变可以获取亚像素级的空间分辨率检测结果,具有较高精度;相对于 MTF 检测的刃边法与脉冲法,辐射状靶标法是根据定义进行在轨 MTF 检测的直接方法,不需通过求导来恢复各个频率成分,有效地避免了多步骤数据处理所引入的误差;相对于包含大气在内的在轨 MTF 检测方法,辐射状靶标法

在相同反射率的大面积靶标配合下,可直接获取大气 MTF 值与不含大气的光学卫星传感器的成像系统 MTF 值,精度提高约 $(1-M_a) \times 100\%$ 。

参 考 文 献

- [1] Xu W W, Zhang L M, Shen Z G, *et al.* On-orbit MTF estimation of high resolution satellite optical sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(2): 97-111.
徐伟伟, 张黎明, 沈政国, 等. 高分辨光学卫星传感器在轨 MTF 检测[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(2): 97-111.
- [2] Leger D, Viallefont F, Deliot P, *et al.* On-orbit MTF assessment of satellite cameras[M]. London: Taylor & Francis Group, 2004: 67-76.
- [3] 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): 0711001.
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): 0711001.
- [4] Peng Y, Huang H L, Zhu L M. The in-orbit resolution detection of TH-01 CCD cameras based on the radial target [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2013, 36(7): 149-151, 154.
彭宇, 黄海乐, 朱雷鸣. 基于辐射状靶标的天绘一号卫星 CCD 相机分辨率在轨检测[J]. *测绘与空间地理信息*, 2013, 36(7): 149-151, 154.
- [5] Choi T. IKONOS satellite on orbit modulation transfer function(MTF) measurement using edge and pulse method[D]. South Dakota State: South Dakota State University, 2002.
- [6] Kohm K. Modulation transfer function measurement method and results for the OrbView-3 high resolution imaging satellite[C]//Proceedings of ISPRS, July 12-23, 2004, Istanbul, Turkey. Vienna: ISPRS, 2004: 12-23.
- [7] Huang H L, Zhu L M, Peng Y, *et al.* Research on MTF of space camera based on an edge method[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(2): 71-73.
黄海乐, 朱雷鸣, 彭宇, 等. 刃边法检测空间相机 MTF 的方法研究[J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(2): 71-73.
- [8] Wang X H, Qiao Y L, Wang L Y, *et al.* In-flight MTF measurement of satellite-board CCD camera [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 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.
- [9] 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 sources [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7):0728001.
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): 0728001.
- [10] Xu W W, Zhang L M, Chen H Y, *et al.* In-flight radiometric calibration of high resolution optical satellite sensor using reflected point sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0328001.
徐伟伟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0328001.
- [11] Leger D, Duffaut J, Robinet F. MTF measurement using spotlight [C] // Proceedings of IGARSS '94 - 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, August 8-12, 2002, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE, 2002: 2010-2012.
- [12] Schowengerdt R A. Remote sensing: models and methods for image processing [M]. 3rd ed. Cambridge: Academic Press, 2007.
- [13] Choi T, Helder D L. Generic sensor modeling for modulation transfer function (MTF) estimation[J]. Pecora 16 Global Priorities in Land Remote Sensing, 2005: 23-27.
- [14] Helder D. On-orbit spatial characterization of IKONOS [Z/OL]. (2002-03-26) [2019-04-01]. http://calval.cr.usgs.gov/JACIE_files/JACIE02/Files/23Helder.pdf.
- [15] Nelson N R, Barry P S. Measurement of hyperion MTF from on-orbit scenes [C] // 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 9-13, 2001, Sydney, Australia. New York: IEEE, 2001: 7320834.
- [16] Leloglu U M, Tunali E. On-orbit modulation transfer function estimation for BiLSAT imagers [C] // Proceedings of ISPRS, July 3-11, 2008, Beijing, China. Vienna: ISPRS, 2008: 45-51.
- [17] Li H W, Zhang H, Chen Z C, *et al.* MTF computing method of remote sensing image after removing the effects of atmospheric adjacency effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328002.
李海巍, 张浩, 陈正超, 等. 去除大气邻近效应影响的遥感图像 MTF 计算方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0328002.
- [18] Coltman J W. The specification of imaging properties by response to a sine wave input[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(6): 468-471.