

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

徐伟伟^{1,2}, 张黎明^{1,2}, 司孝龙^{1,2}, 李 鑫^{1,2}, 杨宝云^{1,2}, 沈政国^{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 调制传递函数(MTF)可用于评估高分辨率光学卫星传感器像质,在轨 MTF 检测对于高分辨率卫星遥感数据的应用和未来卫星遥感器的发展具有重要意义。提出一种基于反射点源的直接检测方法,利用遥感影像数据计算得到成像系统的点扩展函数(PSF),进而获取系统的 MTF 值。根据成像关系和点光源图像数据,并利用非线性方程优化求解的方式得到被测光学卫星传感器成像系统的一维线扩展函数值,进而验证了可近似用高斯模型来表征高分辨率光学卫星传感器的 PSF。实验结果表明,基于反射点源的光学卫星传感器在轨 MTF 检测结果与基于刃边靶标的在轨 MTF 检测结果的差异小于 5%,能够实现高分辨率光学卫星传感器的在轨 MTF 检测。

关键词 遥感; 调制传递函数; 反射点源; 点扩散模型; 高分辨率光学卫星传感器

中图分类号 TP79; O435 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0728001

On-Orbit Modulation Transfer Function Detection of High Resolution Optical Satellite Sensor Based on Reflected Point Sources

Xu Weiwei^{1,2}, Zhang Liming^{1,2}, Si Xiaolong^{1,2}, Li Xin^{1,2},
Yang Baoyun^{1,2}, Shen Zhengguo^{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 Modulation transfer function (MTF) can be used to evaluate the image quality of high resolution optical satellite sensors. On-orbit MTF detection is significant to the application of high resolution satellite remote sensing data and the development of future satellite sensors. A directly detection method based on reflected point source is presented, and the point spread function (PSF) and MTF value are obtained based on remote sensing image data. According to the imaging relationship and point source imaging data, the one-dimensional line spread function value of optical satellite sensor imaging system can be acquired by way of solving non-linear equations. Additionally, the Gaussian model which is usually used to characterize the PSF of high resolution optical satellite sensor is also verified. The results show that the difference of on-orbit MTF detection results of optical satellite sensor based on reflected point sources is less than 5% compared with that of the method based on knife-edge tarps. The proposed approach can achieve on-orbit MTF detection for high resolution optical satellite sensor.

Key words remote sensing; modulation transfer function; reflected point source; point spread model; high resolution optical satellite sensor

OCIS codes 280.4788; 110.4850; 110.3000

收稿日期: 2017-01-24; **收到修改稿日期:** 2017-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(41301374)、中国科学院科技创新基金(CXJJ-14-S89)

作者简介: 徐伟伟(1983—),男,博士,副研究员,主要从事光学遥感器在轨定标及成像质量分析等方面的研究。

E-mail: taiyu555532@gmail.com

1 引 言

调制传递函数(MTF)是光学卫星传感器成像质量的重要技术指标之一,可用来评估星载相机在获取遥感影像过程中正确辨别物体的能力,在小尺度目标识别与判读、信息解译与提取等高分遥感资源的应用上具有重要价值。虽然光学相机在发射前进行过严格的实验室定标与检测,但是卫星遥感成像与地面成像不同,除了受传感器系统的影响外,还受到各种空间环境条件(如卫星的发射过程及在轨运行姿态)的影响,紫外辐照、原子氧、总剂量等引起的传感器电子元器件老化、大气湍流扰动及气溶胶散射等都会影响传感器的像质,同时为保证遥感数据的定量化应用水平,需要在卫星运行期间对其性能进行跟踪检测与监测^[1]。在轨 MTF 检测主要采用数字傅里叶分析法(即根据物像关系对传感器获取的图像结合地面参照目标特性进行数字化处理)得到系统的 MTF。目前国内外发展了刃边法、脉冲法、周期靶标法及点源法等多种方法^[2-8],SPOT 系列、Orbview 系列、资源系列及高分系列等高分辨率卫星多采用这些方法进行在轨 MTF 检测及质评,这些方法各有特点且都取得了一定的在轨 MTF 检测成效。

在轨 MTF 检测的原理:基于遥感器光学系统的物像关系,通过所获取的图像并结合其在地面上选取或布设的检测参照目标特性,再经数字化处理得到光学卫星传感器系统的 MTF。但是,数据处理过程易受噪声及方法固有偏差等因素的影响^[9],如常用的基于刃边或倾斜刃边参照目标的刃边法在轨 MTF 检测,由于刃边本身不包含多种频率成分,需要对从图像提取的边扩展函数进行解析或数值微分来恢复各个频率,该过程必然受噪声干扰,引入额外误差,进而降低在轨 MTF 检测即成像质量评估精度,特别是奈奎斯特频率附近的 MTF 值检测精度不高^[10-12]。脉冲法中作为参照目标的线脉冲存在零频率点,使该方法易受噪声及脉冲宽度等因素的影响而降低了在轨 MTF 检测精度^[2,4]。利用空间分辨率检测的周期性三线靶标进行在轨 MTF 检测时,仅能获得高频即奈奎斯特频率处的单点 MTF 值,虽然充分的统计平均可提高 MTF 检测精度,但是该过程易受大气影响,使检测结果存在一定的离散性^[4-5]。为克服这些在轨 MTF 检测方法的缺点,提出一种基于反射点源的在轨 MTF 直接检测方法,以期提高高分辨率光学卫星传感器的在轨 MTF 检测精度。

根据在轨 MTF 检测的特点,对基于点光源的在轨 MTF 检测原理及参数化点扩展模型验证方法进行了论述,利用研制的反射点源对高分辨率光学卫星传感器进行了在轨 MTF 检测实验,并对结果进行了分析和讨论。

2 检测原理

2.1 点源法 MTF 检测

随着高空间分辨率光学卫星传感器的不断发展,采用在地面上布设既有相对空间像元小得多的尺寸,又有相对背景高得多的亮度的点目标参照来对星载光学遥感器进行像质评估。如图 1 所示,反射镜能够将入射的近似平行的太阳光反射,反射光以一定的角度发散,依据参数设计并与太阳发散角相配合,可使星载遥感器所接收的经反射镜反射的光斑仅占镜面的一个小区域,数值估算的该反射光斑的直径一般在厘米量级,相对于米量级的光学卫星传感器的空间分辨率而言,作为参照目标的反射镜可近似为点激励光源。

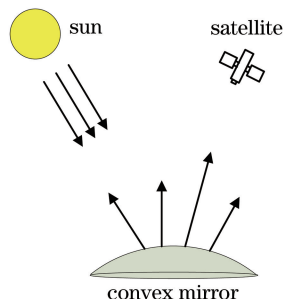


图 1 点源法在轨 MTF 检测

Fig. 1 On-orbit MTF detection by point source method

光学卫星传感器的成像系统通常可假设为线性位移不变系统,进而由光学原理可得星载光学遥感器的成像关系为

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

式中 $g(x, y)$ 为遥感器输出图像, $f(x, y)$ 为参照场景目标, $*$ 为卷积运算符, $h(x, y)$ 为成像系统的点扩展函数(PSF), b 为背景值。

当目标场景参照为点激冲光源(如恒星、聚光灯和反射点源等)时^[1,4,7-8,13-14],根据卷积定理,该星载遥感器的成像关系可简写为

$$g(x, y) = h(x, y) + b, \quad (2)$$

此时,系统输出表现为点扩展特性。

PSF 用来描述光学卫星传感器成像系统影像获取时所产生的亮度模糊现象,成像链路主要包括目标辐射量采集的前置光学系统、光电信号处理的电子学系统以及遥感器焦平面探测器等部分。根据文献调研分析^[15-20],高分辨率卫星 ALI、Eros-B 等恒星观测以及 Quickbird、SPOT 等对地面点目标成像时,星载遥感器系统的点扩展特性均采用高斯模型来表示,因此基于光学卫星成像系统的分析及在轨 MTF 检测实验表明可用高斯模型来表征高分辨率光学卫星传感器的 PSF,即

$$h(x, y) = k \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\zeta^2}\right], \quad (3)$$

式中 k 为系数因子, (x_0, y_0) 为峰值位置, (σ, ζ) 为标准偏差。

光学卫星传感器系统对反射点源目标的响应可表示为

$$g(x, y) = k \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\zeta^2}\right] + b. \quad (4)$$

通过物像关系并结合在轨 MTF 检测的点目标设置与其遥感影像,采用最小二乘法拟合获取系统 PSF,接着对其进行傅里叶变换及归一化处理,得到星载遥感器系统 MTF 为

$$F_{\text{MTF}}(\nu, \xi) = |\text{DFT}[g(x, y)]|, \quad (5)$$

式中 $F_{\text{MTF}}(\cdot)$ 为 MTF 函数, DFT 代表傅里叶变换。

对目前广泛应用于遥感的光电遥感器而言,采样效应导致的地面检测参照目标与星载光学传感器 CCD 像元的相对位置是不可知的,具有随机性,故采用非整数像素间隔阵列的方法^[6-7,21-22],如图 2(a)所示,布设 4×4 反射点源阵列,并联合多个探测元来对 MTF 检测参照目标进行扫描成像,以获取亚像素插值的星载遥感器系统 PSF 估计、有效抑制噪声与采样效应影响并确保在轨 MTF 检测精度。

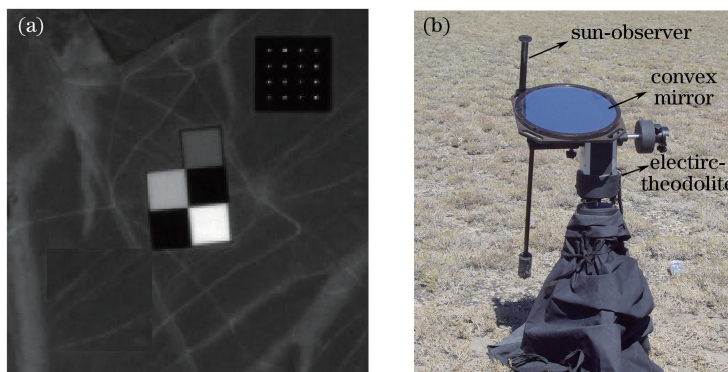


图 2 遥感影像及反射点源阵列。(a)影像;(b)反射式点光源

Fig. 2 Remote sensing image and reflected point source array. (a) Image; (b) reflected point source

2.2 点扩展模型检验

根据光学卫星传感器成像系统 PSF 可分离性的假设^[15],参照场景目标为点激冲光源时,(2)式可简写为

$$g(x, y) = h_x(x)h_y(y) + b, \quad (6)$$

式中 $h_x(x)$ 、 $h_y(y)$ 分别为遥感成像系统垂轨与顺轨方向的一维线扩展函数(LSF)。

星载光学遥感器对反射点源的响应值是表征成像系统特性的垂轨方向点扩展值与顺轨方向点扩展值的

乘积与背景值之和。对于 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 的反射点源遥感影像,根据(6)式列 25 个方程,其中有 12 个未知数待解,通过非线性方程优化求解得到表征成像系统特性的离散,LSF 值为

$$\epsilon_{\min} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \{g(x_i, y_j) - [h_x(x_i)h_y(y_j) + b]\}^2. \quad (7)$$

将解算得到的 LSF 值进行一维高斯拟合,以获取点光源响应的峰值位置与拟合相关系数,通过曲线拟合的相关系数验证高分辨率光学卫星传感器成像系统点扩展模型的准确性,同时通过将该峰值位置与高斯模型法中的位置检测值进行比较,判断点光源响应的位置检测精度。

3 实验及数据处理

利用研制的反射点源对高分辨率光学卫星传感器的像质等性能评价参数进行了在轨 MTF 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分别沿星载光学遥感器的垂轨与顺轨方向布设了反射点源阵列与大面积刃边靶标,如图 2 所示。作为检测参照目标的轻小型反射点源主要由太阳观察器、反射镜、高精度电动经纬仪及辅助设备等组成。优化设计的反射镜能够反射适量的光,以使发射光通量与星载传感器可接收的光通量相匹配;通过太阳观察器能够实现对反射点源初始指向的调整与电动经纬仪的角度定标;电动经纬仪能够根据输入的卫星预报参数实现太阳-反射点源-光学传感器三者之间光路的自动配准,进而实现光学卫星传感器对反射点源的观测成像。

点源法在轨 MTF 检测时需要布设一定数量的反射点源,如图 2(a)所示,构成非整数像素间隔的循环矩阵(4×4 阵列)。相邻反射点源之间的距离为 8.25 pixel ,保证了相邻点源响应之间的相对相位差 (0.25 pixel);相间反射点源间的相对相位差为 0.5 pixel ,从而可获得较多采样数据,系统空间特性的 PSF 可将亚像素插值至 0.25 pixel ,以有效抑制噪声及采样效应对 MTF 检测精度的影响。

根据点源法在轨 MTF 检测的基本原理,采用参数化点扩展模型对点源响应数据进行曲面拟合,如图 3 所示,以确定每个反射点源响应的峰值位置,结果如表 1 所示。表中 x_c 与 y_c 为峰值位置的相对像素坐标, M-i 表示不同的点光源, $i=1, 2, \dots, 16$ 。与刃边法在轨 MTF 检测方法相似,点源法在轨 MTF 检测通过对所有点源响应数据进行位置配准来获取亚像素插值的点扩展响应,即星载传感器成像系统的点扩展轮廓,以降低成像系统中采样效应与随机噪声对检测结果的影响,提高点源法在轨 MTF 检测精度。

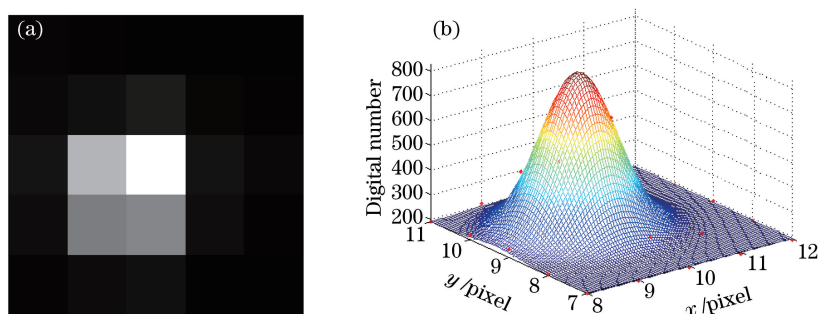


图 3 位置检测。(a)点光源 1 图像;(b)曲面拟合

Fig. 3 Position detection. (a) Image of point source 1; (b) surface fitting

表 1 峰值参数

Table 1 Peak parameters

Parameter	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
x_c/pixel	9.5893	16.6161	24.9510	33.2067	9.1153	16.6019	24.9516	33.1932
y_c/pixel	9.3095	9.4474	9.4500	8.5830	16.8217	16.8219	16.8008	16.8892
Parameter	M-9	M-10	M-11	M-12	M-13	M-14	M-15	M-16
x_c/pixel	9.1262	16.5679	24.9518	33.1465	9.1498	16.5482	24.9212	33.1373
y_c/pixel	25.1136	24.9660	24.9613	24.9750	33.2197	33.3032	33.2009	33.3271

对亚像素插值的点源响应数值进行参数化高斯模型拟合,求得光学卫星传感器成像系统的 PSF,如图 4(a)所示,对 PSF 进行傅里叶变换并归一化处理得到系统 MTF 曲线,如图 4(b)所示。

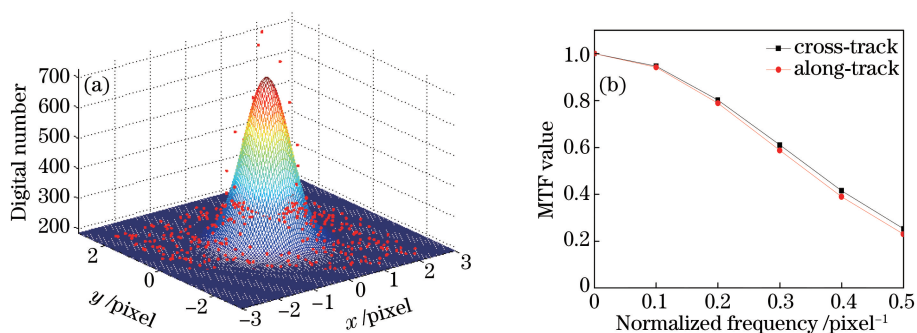


图 4 系统空间响应。(a)系统 PSF;(b) MTF 曲线

Fig. 4 Spatial response of system. (a) PSF of system; (b) MTF curves

4 分析讨论

基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨 MTF 检测,应用高斯模型来表征遥感器成像系统的点扩展特性,进而通过离散傅里叶变换获取系统像质评价的 MTF 参数。利用点源在实验室对光电图像遥感器进行 MTF 检测,可消除采样效应的影响。在轨 MTF 检测时,虽然通过布设非整数像素间隔阵列点源的方法可克服采样效应的影响,但是还要考虑作为检测参照目标的点源形式、结构以及数据处理过程中应用的点扩展模型的准确性。另外,将基于反射点源的光学卫星传感器在轨 MTF 检测结果与常用的刃边法在轨 MTF 检测结果相比较,验证了该方法的可行性与有效性。

作为检测参照目标的反射点源既有小得多的空间尺寸,又有高得多的辐射亮度,可使光学卫星传感器对其成像且不饱和,但这种点目标在自然物中不易寻找。在轨 MTF 检测实验表明,反射点源可作为点目标来对高分辨率光学卫星传感器进行像质评估等性能检测,相较于法国空间研究中心应用于 SPOT 卫星高分辨率相机在轨 MTF 检测的主动点源(高能聚光灯)等在轨 MTF 检测设备,反射点源不需要对辐射能量进行定标,不存在与太阳反射波段的光谱非一致性,并且不需要大功率电源供电;相较于刃边靶标等在轨 MTF 检测设备,这种小型化、轻量化的反射点源目标运输携带和布设方便,可快速移动,机动性强,具有较高应用效率和适用性,能够实现高分辨率光学卫星传感器高精度、高频次、常态化的在轨性能检测与评估。

刃边法在轨 MTF 检测方法要求有两块对比度较大且相对均匀的区域以直线相交,构成刃边。利用星载光学遥感器系统对刃边参照所获取遥感影像进行分析处理,得到系统的 MTF 曲线,主要过程包括刃边位置检测及配准、边扩展函数拟合/求导、离散傅里叶变换等^[23],图 5 所示为基于反射点源的光学卫星传感器在轨 MTF 检测结果与刃边法在轨 MTF 检测结果。基于反射点源的在轨 MTF 检测得到垂轨方向和顺轨方向的 MTF 值分别为 0.2529 和 0.2296;刃边法在轨 MTF 检测得到垂轨方向和顺轨方向的 MTF 值分别为

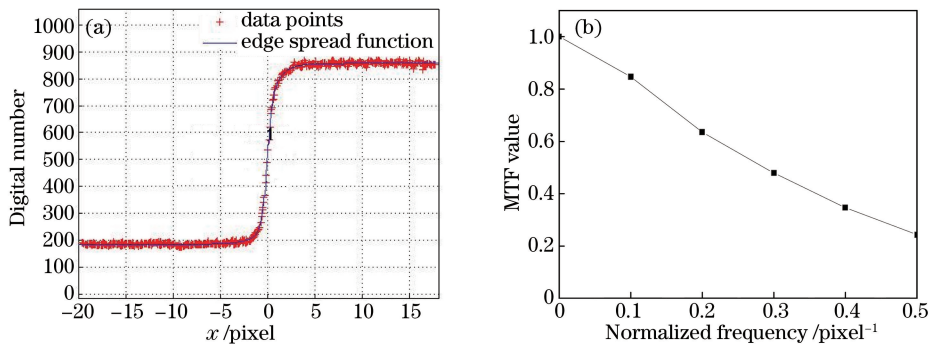


图 5 刃边法在轨 MTF 检测结果。(a)边扩展函数拟合;(b) MTF 曲线

Fig. 5 On-orbit MTF detection results of knife-edge method. (a) Edge spread function fitting; (b) MTF curve

0.2425 和 0.2187;垂轨方向与顺轨方向检测结果的差异分别为 4.29%与 4.98%,具有较好的一致性,验证了基于反射点源的光学卫星传感器在轨 MTF 检测方法的可行性与有效性。刃边法在轨 MTF 检测需要通过求导来恢复各个频率成分;点源法根据 MTF 的定义进行光学卫星传感器在轨 MTF 检测,相较于刃边法具有较高的抗噪能力与检测精度。

对于点源法在轨 MTF 检测数据处理过程,应用高斯模型来描述高分辨率光学卫星传感器成像系统的 PSF,进而获取系统的 MTF,为此需要对系统点扩展模型的准确性进行验证。根据系统 PSF 可分离的假设与点光源响应的遥感图像数据,利用非线性方程优化求解的方式,解算得到表征系统空间响应特性的垂轨方向与顺轨方向的离散 LSF 值,如表 2 所示。

表 2 LSF(点光源 1)及 k, b 的值
Table 2 Values of LSF (point source 1), k and b

Direction	Value of LSF					k	b
	1	2	3	4	5		
Cross-track	0.5574	5.0996	6.5303	0.5296	0.1303	9.4418	187.6434
Along-track	0	0.7178	7.2779	4.1812	0.4688		

将解算得到的一维 LSF 值进行高斯拟合,如图 6 所示。得到的点光源响应的峰值位置 x_c, y_c 与拟合相关系数 R_x^2, R_y^2 如表 3 所示。根据相关系数对点源法在轨 MTF 检测方法中采用的参数化模型的准确性进行验证,同时比较点源法在轨 MTF 检测与刃边法在轨 MTF 检测得到的峰值位置检测精度。

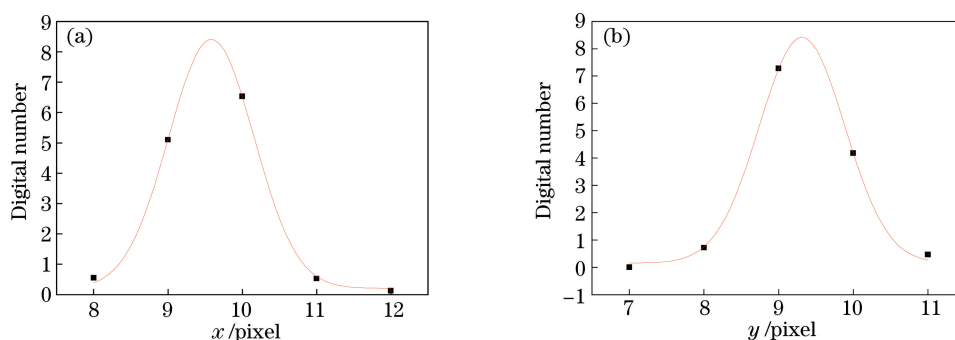


图 6 LSF 拟合(点光源 1)。(a)垂轨方向;(b)顺轨方向

Fig. 6 LSF fitting (point source 1). (a) Cross-track direction; (b) along-track direction

表 3 拟合参数

Table 3 Fitting parameters

Parameter	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
R_x^2	0.9989	0.9989	0.9989	0.9989	0.9998	0.9996	0.9994	0.9978
x_c/pixel	9.5829	16.6162	24.9464	33.2226	9.1212	16.6020	24.9490	33.2031
R_y^2	0.9983	0.9989	0.9998	0.9992	0.9987	0.9966	0.9998	0.9999
y_c/pixel	9.3143	9.4403	9.4432	8.5823	16.8119	16.8073	16.7957	16.8882
Parameter	M-9	M-10	M-11	M-12	M-13	M-14	M-15	M-16
R_x^2	0.9987	0.9993	0.9996	0.9997	0.9977	0.9987	0.9993	0.9993
x_c/pixel	9.1369	16.5835	24.9487	33.1526	9.1546	16.5481	24.9201	33.1489
R_y^2	0.9997	0.9960	0.9998	0.9995	0.9960	0.9994	0.9978	0.9999
y_c/pixel	25.1144	24.9564	24.9599	24.9744	33.2305	33.3052	33.2155	33.3226

点源法在轨 MTF 检测和刃边法在轨 MTF 检测的检测结果比较接近,系统 PSF 模型拟合的相关系数均大于 0.9980,峰值位置参数具有较好的一致性,最大检测误差优于 0.05 pixel,如表 4 所示,从而验证了应用于高分辨率光学卫星传感器的 PSF 模型或 MTF 模型,可近似用高斯模型来描述。同时高精度的位置检测使该轻小型的反射点源在高分辨率光学卫星传感器的在轨几何检校方面也具有很大的优势。

表 4 位置检测误差
Table 4 Error of position detection

Parameter	Error /pixel							
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
x_c	0.0064	-0.0001	0.0046	-0.0159	-0.0059	-0.0001	0.0026	-0.0099
y_c	-0.0048	0.0071	0.0068	0.0007	0.0098	0.0146	0.0051	0.0010
Parameter	Error /pixel							
	M-9	M-10	M-11	M-12	M-13	M-14	M-15	M-16
x_c	-0.0107	-0.0156	0.0031	-0.0061	-0.0048	0.0001	0.0011	-0.0116
y_c	-0.0008	0.0096	0.0015	0.0006	-0.0108	-0.0020	-0.0146	0.0045

高分辨率光学卫星在轨几何定标的核心任务就是通过地面控制点检测得到相机高精度的内外方位元素等几何性能参数,目前地面控制点的量测精度及星上全球定位系统(GPS)精度已达到厘米量级。像点量测是几何定标中不可缺少的步骤,一般采用人眼观测的最优中误差为 0.3 pixel^[24],地面-卫星-相机这三位一体的立体测绘精度与地面量测及星上 GPS 测量精度完全不匹配。轻小型的反射点源结合相应的像点量测算法可方便地在遥感器的幅宽范围内进行网络化布设,有望形成高精度的地面控制点,以提高光学卫星传感器在轨几何检校精度。

5 结 论

通过对点源法在轨 MTF 检测理论的分析,利用轻小型反射点源阵列对高分辨率光学卫星传感器进行了在轨性能检测实验,点光源在遥感影像上清晰可见。实验结果表明,小型化、轻量化的反射点源可作为参照目标来对光学卫星传感器进行像质评估,点源法在轨 MTF 检测与刃边法在轨 MTF 检测结果的差异小于 5%,具有较好的一致性,验证了基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨 MTF 检测方法的可行性与有效性。根据成像系统 PSF 可分离的假设,结合反射点源的遥感影像数据,利用非线性方程优化求解的方式,验证了参数化点扩展模型的准确性。点源法是根据 MTF 的物理定义进行光学卫星传感器在轨 MTF 检测的直接方法,不需要像刃边法在轨 MTF 检测那样通过求导来恢复各个频率成分;作为检测参照目标的反射点源不需要辐射定标与大功率电源供电等,有望作为高精度的地面控制点,以提高光学卫星传感器的在轨几何检校精度,进而实现高分辨率光学卫星传感器高精度、高频次、常态化的在轨性能检测。

参 考 文 献

- [1] Léger D, Viallefont F, Deliot P, *et al.* On-orbit MTF assessment of satellite cameras[M]. London: Taylor & Francis Group, 2004: 67-76.
- [2] Choi T. IKONOS satellite on orbit modulation transfer function measurement using edge and pulse method[D]. South Dakota: South Dakota State University, 2002.
- [3] Kohm K. Modulation transfer function measurement method and results for the Orbview-3 high resolution imaging satellite[C]. Proceedings of ISPRS, 2004: 12-23.
- [4] Xu Weiwei, Zhang Liming, Shen Zhengguo, *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.
- [5] Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *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.
- [6] Wang Xianhua, Qiao Yanli, Wang Leyi, *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.

- [7] Léger D, Duffaut J, Robinet F. MTF measurement using spotlight[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994, 4: 2010-2012.
- [8] Li X B, Jiang X G, Tang L L, *et al.* On-orbit MTF estimation methods for satellite sensors[C]. Asia-Pacific Space Outlook, 2007, 2: 38-43.
- [9] Choi T, Helder D. Generic sensor modeling for modulation transfer function (MTF) estimation[J]. Pecora 16 Global Priorities in Land Remote Sensing, 2005: 1-12.
- [10] Helder D, Choi J. On-orbit spatial characterization of IKONOS[OL]. (2002-03-26) [2017-05-01]. https://calval.cr.usgs.gov/JACIE_files/JACIE02/Files/23Helder.pdf.
- [11] Nelson N R, Barry P S. Measurement of hyperion MTF from on-orbit scenes[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001: 7320834.
- [12] Leloglu U M, Tunali E. On-orbit modulation transfer function estimation for BiLSAT imagers[C]. Proceedings of ISPRS, 2006: 45-51.
- [13] Bowen H S, Dial G. IKONOS calculation of MTF using stellar images[OL]. [2017-05-01]. <https://calval.cr.usgs.gov/wordpress/wp-content/uploads/21Bowen.pdf>.
- [14] Xu Weiwei, Zhang Liming, Chen Hongyao, *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研究[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0328001.
- [15] Schowengerdt R A. Remote sensing: Models and methods for image processing[M]. San Diego: Academic Press, 2007.
- [16] Kenneth J M. The matphot algorithm for digital point spread function CCD stellar photometry[C]. SPIE, 2002, 4847: 207-216.
- [17] Storey J. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation[C]. SPIE, 2001, 4540: 50-61.
- [18] Schowengerdt R A. Spatial response of the EO-1 advanced land imager (ALI)[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, 6: 3121-3123.
- [19] Xu Q, Schowengerdt R A. Urban targets for image quality analysis of high resolution satellite imaging systems[C]. SPIE, 2003, 5108: 31-38.
- [20] Rangaswamy M. Quickbird II two-dimensional on-orbit modulation transfer function analysis using convex mirror array[D]. South Dakota: South Dakota State University, 2003.
- [21] Rauchmiller 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): 334-343.
- [22] Robinet F, Leger D, Cerbelaud H, *et al.* Obtaining the MTF of a CCD imaging system using an array of point sources: Evaluation of performances[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1991, 3(9): 1357-1361.
- [23] Huang Haile, Zhu Leiming, Peng Yu, *et al.* Research on MTF of space camera based on 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.
- [24] Fan Dazhao, Liu Chubin, Lei Rong, *et al.* Detection of constant angular error for ZY03 panchromatic imagery[J]. Geomatics World, 2013, 20(4): 37-40.
范大昭, 刘楚斌, 雷蓉, 等. 资源三号卫星全色影像的姿态角常数检测[J]. 地理信息世界, 2013, 20(4): 37-40.