

光学卫星相机在轨调制传递函数检测方法

徐伟伟*, 张黎明, 杨宝云, 王戟翔

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

摘要 调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 是光学卫星相机成像质量评价的重要参数之一, 在轨 MTF 检测关系到遥感数据的应用和未来遥感相机的发展。针对目前对地观测中广泛应用的光电成像系统, 以反射点源阵列、辐射状靶标和面积刃边靶标等便于数学描述的特殊点线面目标作为参照, 依据 MTF 的物理定义, 通过亚像元位置检测与参数化模型拟合等, 对卫星相机进行了在轨 MTF 检测。实验结果表明: 点源法是最严密的检测方法, 可以全面表征遥感相机的成像能力; 方波法在大面积靶标配合下, 能直接获取成像系统在奈奎斯特频率处的 MTF 值; 刃边法是光学相机常用的检测方法, 但是仅能获取沿轨与垂轨方向的 MTF。三种方法所得的在轨 MTF 的检测结果具有较好的一致性, 最大相对误差优于 6.00%。这些方法各有特点, 其适用性存在一定差异。

关键词 遥感; 调制传递函数; 点源法; 方波法; 刃边法

中图分类号 O435; TP79

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2228001

On-Orbit Modulation Transfer Function Estimation of Optical Satellite Camera

Xu Weiwei*, Zhang Liming, Yang Baoyun, Wang Jixiang

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

Abstract Modulation transfer function (MTF) is one of the important parameters for the image quality evaluation of optical satellite cameras. On-orbit MTF estimation has a bearing on the application of remote sensing data and the future development of remote sensing cameras. For the photoelectric imaging system widely used for earth observation at present, according to the physical definition of MTF, the satellite cameras are subjected to on-orbit MTF estimation through subpixel position detection and parameterized model fitting, during which the special point, line, and plane targets for convenient mathematical description are taken as references, such as reflecting point source arrays, radial targets, and large-area knife-edge targets. The experimental results show that the point source method is the most rigorous estimation approach and can fully characterize the imaging capability of remote sensing cameras. In contrast, with the assist of large-area targets, the square wave method can directly obtain the MTF value at the Nyquist frequency of the imaging system, and the knife-edge method is a common estimation method of optical cameras but can only have access to the MTF in the orbit direction and that perpendicular to the orbit direction. On-orbit MTF values obtained by the above three methods are of good consistency and the maximum relative error is smaller than 6.00%. At the same time, the above methods have their own characteristics and varied applicability.

Key words remote sensing; modulation transfer function; point source method; square wave method; knife-edge method

OCIS codes 110.4850; 280.4788; 110.3000

1 引 言

卫星遥感以其全面客观的优势已成为对地观测的重要手段, 随着经济建设和科技的发展, 自然资源调查与评价、生态环境监测与保护及应急管理决策

与响应等需要全天时全天候的高质量高分辨率对地观测数据的支持。遥感数据已被广泛应用于科学研究中, 光学卫星也面临着更高的数据产品质量和长期精度保持的要求, 这无疑对包含调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 检测在内的

收稿日期: 2020-04-30; **修回日期:** 2020-05-29; **录用日期:** 2020-08-03

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

像质评价技术提出了更高的要求^[1]。MTF 表征了卫星遥感成像系统对不同空间尺度目标,特别是小尺度目标的调制传递特性,在目标识别与判读及图像解译与提取等方面具有重要价值。

在轨 MTF 检测主要是根据相机成像系统的物像关系,结合地面参照目标特性与遥感影像,采用傅里叶分析法得到表征光学卫星相机空间响应特性的 MTF。虽然光学相机发射前都在实验室进行了严格的定标与性能检测,但是对于目前广泛应用于遥感的光电成像系统而言,由于包含了像元采样的过程,测量成像系统总的空间响应特性变得更为复杂,同时探测元件的过程会受电子滤波器和图像运动的影响,实验室很难对所有这些因素进行模拟^[2]。另外,卫星发射振动、大气效应及发射后的热聚焦或太空环境中传感器的排气过程都可能造成光学卫星相机成像系统 MTF 的改变,故发射后的在轨 MTF 的检测与监测对于保证遥感数据产品质量具有非常重要的意义。航天光学相机在轨 MTF 检测常采用点、线和面等比较容易进行数学描述的目标,即点源、方波和刃边参照,形成了点源法、方波法和刃边法等 MTF 检测方法,这些方法被广泛应用于光学卫星 SPOT 系列、WorldView 系列、资源系列和高分系列等遥感相机的像质评价中,均取得了一定的在轨检测成效^[3-8]。在轨检测参照的点源目标在自然地物中不易寻找,且星点靶标的信噪比较差,高能主动点源存在与太阳光谱的非一致性,这些都是影响点源法在轨 MTF 检测精度的因素^[9]。作为方波目标的周期性三线靶标或辐射状靶标,可以用于进行在轨空间分辨率检测与奈奎斯特频率处的 MTF 值检测,但是方波靶标的布设需与卫星轨道精确匹配,且易受大气影响^[5]。刃边参照本身并不包含多种频率,需通过求导来恢复各频率成分,多步骤的数据处理易引入额外误差与噪声,从而降低奈奎斯特频率处的 MTF 检测精度^[6-7]。

针对目前对地观测的光电成像系统,根据 MTF 物理定义,在实验场区设置反射点源阵列、辐射状靶标和倾斜刃边靶标等便于数学表达的点线面参照目标,在对 MTF 检测原理进行论述的同时,综合采用点源法、方波法与刃边法对光学卫星相机进行像质评价,并对结果进行分析讨论,以期提高光学卫星相机的在轨 MTF 检测精度。

2 基本原理

2.1 点源法

根据遥感成像系统的物像关系及卷积定理,当

系统输入为地面反射点源时,光学卫星相机的输出表现为系统自身的特性即点扩散特性:

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

式中: (x, y) 是图像的像素坐标; $g(x, y)$ 是相机输出图像; $h(x, y)$ 是系统点扩散函数; b 是背景值。

点扩散函数常用来描述相机成像系统影像获取时的亮度模糊现象,高分辨率光学卫星的恒星观测与地面点源成像^[9-10]均采用高斯模型表征系统的点扩散特性,因此,光学卫星相机对反射点源的响应可表示为

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

式中: k 是系数; (x_0, y_0) 是峰值坐标; σ 和 ζ 分别是模型横向与纵向的标准偏差。

结合 MTF 的物理定义、反射点源的设置及其遥感影像,利用最小二乘法拟合得到卫星相机成像系统的点扩散函数(PSF),通过傅里叶变换即得系统的 MTF:

$$M_{\text{MTF}}(\nu, \xi) = |\mathcal{F}[g(x, y)]|, \quad (3)$$

式中: M_{MTF} 是系统的 MTF 函数; ν 为横向频率; ξ 为纵向频率; $\mathcal{F}(\cdot)$ 是傅里叶变换。

2.2 方波法

根据 MTF 定义,当光学卫星相机对某频率正弦靶标进行成像检测时,像方调制度与物方调制度之比即为该频率处的 MTF 值。由于正弦靶标制作困难,方波靶标不具普适性,而辐射状靶标的线宽呈梯形连续渐变,可作为改进的方波靶标进行在轨应用^[11-12],即直接检测相机对比度传递函数(CTF)。由傅里叶级数和采样定理可知

$$M_{\text{MTF}}(\nu') = \frac{\pi}{4} C_{\text{CTF}}(\nu'), \quad (4)$$

式中: ν' 是频率; $M_{\text{MTF}}(\nu')$ 是相机系统的 MTF; $C_{\text{CTF}}(\nu')$ 是相机系统的 CTF。

像方调制度由辐射状靶标影像的可分辨分界点响应值得到,而由辐射传输理论可知,用于计算卫星相机入瞳处物方调制度的靶标辐亮度与靶标反射率和大气有关,因此结合相机系统为线性位移不变系统的假设,采用布设靶标反射率与辐射状靶标反射率相同的大面积靶标方法^[5],通过直接读取大面积靶标影响应值来计算物方调制度:

$$M(0) = \frac{D_{1,h} - D_{1,l}}{D_{1,h} + D_{1,l}}, \quad (5)$$

式中: $M(0)$ 是相机入瞳物方调制度; $D_{1,h}$ 与 $D_{1,l}$ 分

别是大面积靶标影像扣除暗电流后的高、低响应值。

据此可得光学卫星相机在奈奎斯特频率处的MTF值:

$$M_{\text{MTF}}(\nu') = \frac{\pi}{4} \times \frac{D_{f,h} - D_{f,l}}{D_{f,h} + D_{f,l}} \times \frac{D_{l,h} + D_{l,l}}{D_{l,h} - D_{l,l}}, \quad (6)$$

式中: $D_{f,h}$ 与 $D_{f,l}$ 分别是辐射状靶标影像扣除暗电流后的高、低响应值。

利用现场同步或准同步测量的辐射状靶标反射率获取地面调制度,将其与基于大面积靶标遥感影像计算所得的卫星相机入瞳处物方调制度进行比较,可以获得大气的MTF值,进而获得包含大气与卫星遥感成像系统在内的总成像链路的MTF值。

2.3 刃边法

两块具有高低反射率且分布相对均匀的区域以直线相交,并构成了刃边,对于线性位移不变系统的卫星遥感相机来说,输出影像表现为成像系统的边扩散函数:

$$g(x', y') = f(x', y') * h(x', y'), \quad (7)$$

式中: (x', y') 是影像的像素坐标; $g(x', y')$ 是相机输出影像; $f(x', y')$ 是刃边参照目标; $h(x', y')$ 是系统点扩散函数;*表示卷积运算。

刃边目标在数学上表示为阶跃函数,其在刃边平行方向为常数,且归一化线扩散函数积分为1,根据系统PSF的可分离性,卫星相机在垂直刃边方向的输出可简化为

$$g'(x') = f'(x') * h'(x'), \quad (8)$$

式中: $g'(x')$ 是相机刃边图像即边扩散函数; $f'(x')$ 是刃边阶跃函数; $h'(x')$ 是系统一维点扩散函数即线扩散函数。

根据卷积的微分性质,可得相机成像系统的一维点扩散特性即线扩散函数:

$$\frac{dg'(x')}{dx'} = \frac{df'(x')}{dx'} * h'(x') = \delta(x') * h'(x') = h'(x'), \quad (9)$$

式中: $\delta(x')$ 是冲击函数。

结合MTF定义、刃边目标设置与遥感影像,通过边扩散函数拟合与微分得到光学卫星相机成像系统的一维PSF即线扩散函数(LSF),利用傅里叶变换得到系统的MTF。

3 实验与数据处理

高分辨光学卫星共搭载五台相机,其中三台为5 m分辨率全色立体测绘相机,一台为2 m分辨率

全色高分辨相机,一台为10 m分辨率多光谱相机,利用这些器件完成了立体测图与地物属性的定量反演。在辐射定标场开展了基于点线面参照目标的光学卫星相机在轨像质评价实验,如图1所示,分别布置了反射点源阵列、辐射状靶标与大面积刃边靶标。其中,反射点源阵列为非整数像素间隔的 4×4 循环矩阵,沿着卫星飞行方向布置,相邻点源间距8.25 pixel,保证相邻点源响应的相对相位差为0.25 pixel,相间点源响应的相对相位差为0.5 pixel。辐射状靶标的最大弦长为6.4 m,半径为167 m,弦长每变化1 m时半径增长约26 m,靶标边沿与卫星飞行方向夹角约为 10° 。考虑到大气散射、卫星平台运动、成像系统点扩散与探测器数字采样效应等因素会导致系统成像模糊,从而靶标对比度降低,结合传感器动态范围,设置靶标反射率分别为5%与60%。大面积刃边靶标的边长均为100 m,高低反射率交界的刃边与卫星飞行方向夹角约为 7° ,反射率分别为5%与60%,与辐射状靶标相同。轻小型自动化反射点源主要由反射镜、高精度电控经纬仪与太阳观察器等部件组成^[8,13],优化设计的反射镜可以使入射太阳光呈一定角度发散,便于卫星相机观测。通过光线追迹与数值估算可知,相机接收的反射光斑仅为镜面上直径为厘米甚至毫米量级的小区域,相对米量级分辨率的光学卫星相机,可以将反射点源近似为高能量点光源。大面积的刃边靶标一方面作为刃边法MTF在轨检测的参照目标,用于获取光学卫星相机沿轨与垂轨方向的MTF;另一方面与辐射状靶标一起作为方波法MTF在轨检测的参照目标,用于获取遥感相机入瞳处的物方调制度与输出的像方调制度,进而获取遥感成像系统在奈奎斯特频率处的MTF。利用现场同步或准同步测量靶标反射率获取地面调制度,通过结合该地面调制度可以获取包含大气与卫星遥感成像系统在内的总MTF以及大气MTF值。

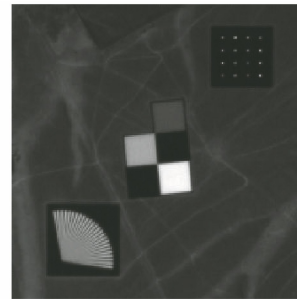


图1 目标遥感影像

Fig. 1 Remote sensing image of targets

3.1 点源法

点源法在轨 MTF 检测采用参数化高斯模型对反射点源影像进行二维曲面拟合,以确定每个点源影像的峰值位置,据此对所有点源数据进行位置配准,进而准确获取亚像素插值的点扩散轮廓,降低遥感成像系统的采样效应和随机噪声对 PSF 检测结果的影响。再次通过曲面拟合求得光学卫星相机 PSF,根据 MTF 的物理定义,对其进行傅里叶变换,得到系统的 MTF。点源法检测结果如图 2 所示。

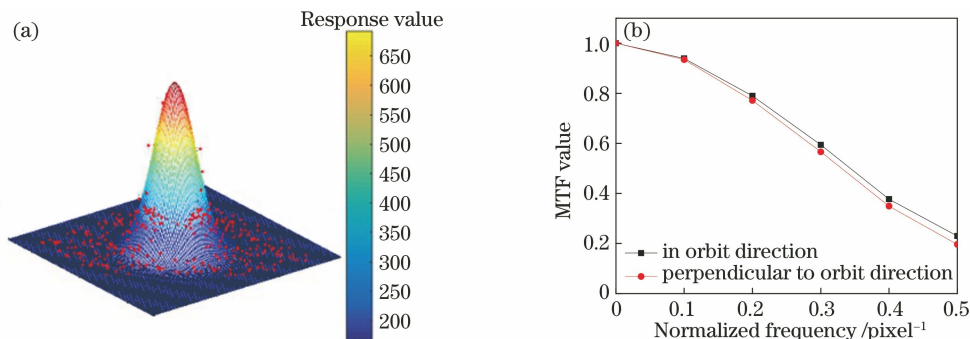


图 2 点源法检测结果。(a)拟合的点扩散函数;(b)MTF 曲线

Fig. 2 Estimation results by point source method. (a) Fitted point spread function; (b) MTF curve

3.2 方波法

由方波法在轨 MTF 检测原理可知,可通过选取与辐射状靶标反射率相同的大面积靶标,利用其遥感影像在高低反射率靶标图像中央区域的响应值来获得物方调制度。统计分析结果显示,物方调制度为 0.6481,如表 1 所示。通过选取辐射状靶标遥

感影像中可分辨分界点处高低反射率靶标的响应值来获取像方调制度,统计分析结果显示,中央区域在奈奎斯特频率处的垂轨与沿轨方向上的像方调制度分别为 0.1691 与 0.1471,根据 MTF 定义得到系统在垂轨与沿轨方向上的 MTF 值分别为 0.2049 与 0.1783。

表 1 靶标影响应值

Table 1 Image response values of targets

Relative pixel coordinate	Large-area target		Radial target	
	Low reflectance	High reflectance	In orbit direction	Perpendicular to orbit direction
(1,1)	184	855	443	416
(1,2)	185	856	593	423
(1,3)	182	858	441	435
(2,1)	183	856	430	590
(2,2)	186	857	581	598
(2,3)	183	859	431	606
(3,1)	182	859	421	419
(3,2)	183	859	568	424
(3,3)	182	856	424	432

3.3 刃边法

基于倾斜刃边靶标的在轨 MTF 检测方法,采用参数化模型对刃边靶标遥感影像进行刃边位置检测,通过线性拟合获取了亚像素级的刃边像素坐标,据此对刃边影像数据进行位置配准,进而准确获取亚像素插值的边扩散廓线,降低采样效应和随机噪声对刃边响应提取精度的影响。通过参数化边扩散函数拟合与解析微分,得到遥感相机成像系统的线扩散函数即一维 PSF,根据 MTF 物理定义,通过傅里叶变换得到系统的 MTF。刃边法的检测结果如图 3 所示,其中 X 为相对像素坐标,即靶标影像相

对刃边位置的像素坐标。

3.4 在轨 MTF

基于点线面等参照目标的光学卫星相机在轨 MTF 检测结果如表 2 所示,可以看出这些结果具有较好的一致性,检测结果相对平均值的最大相对误差优于 6.00%。按照 MTF 物理定义可知,作为直接检测方法的点源法与方波法在垂轨与顺轨方向上的 MTF 差异分别为 0.0250 与 0.0181,方波法在轨 MTF 检测结果与刃边法检测结果在垂轨与顺轨方向上的差异分别为 -0.0136 与 -0.0063,因此相对点源法与刃边法,方波法的在轨 MTF 检测结果较

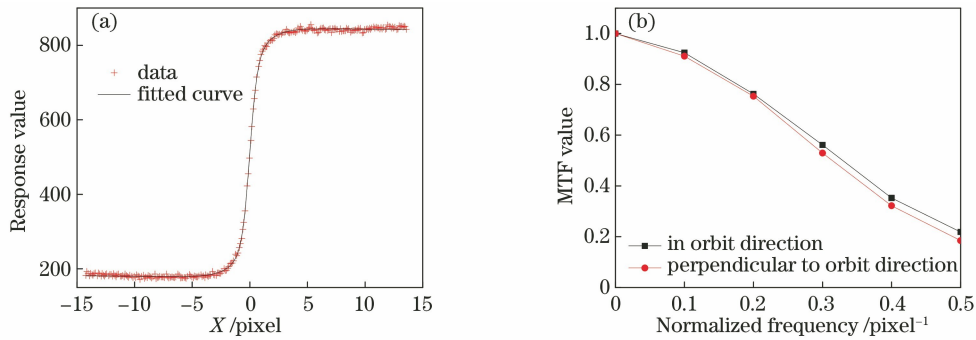


图 3 刃边法的检测结果。(a)拟合的边扩散;(b) MTF 曲线

Fig. 3 Estimation results by knife-edge method. (a) Fitted edge spread; (b) MTF curve

表 2 在奈奎斯特频率处的在轨 MTF 检测结果

Table 2 On-orbit MTF detection results at Nyquist frequency

Direction	Point source method	Square wave method	Knife-edge method	Relative error /%
In orbit direction	0.2299	0.2049	0.2185	-5.91
Perpendicular to orbit direction	0.1964	0.1783	0.1846	5.35

小。这主要是由于作为检测参照的辐射状靶标中的高低反射率辐条宽度仅为卫星相机空间分辨率级,且遥感成像过程受大气散射、平台运动、光学系统点扩散与探测器采样等因素影响,因此方波法易受噪声影响。点源法 MTF 检测结果与刃边法检测结果在垂轨与顺轨方向上的差异分别为 0.0114 与 0.0118,且点源法检测结果高于刃边法检测结果,这与实验室静态检测 MTF 的结果一致。

4 分析讨论

关于在轨 MTF 检测的点源法、方波法与刃边法等已经被成功应用于多型号高分辨率光学卫星相机的在轨定标与像质评价,均取得了良好的应用效果,并在遥感影像质量评定与遥感数据量化应用中发挥了重要作用,但是三种方法的特点和适用性存在一定差异。

综合分析光学卫星相机对地面布设的典型点线面等特殊参照目标的遥感成像特性,基于目标遥感影像处理,通过提取表征相机系统空间响应特性的二维点扩散函数与一维边扩散函数,利用傅里叶分析得到像质评价参数 MTF。1)点源法是根据 MTF 物理定义进行的,理论上是最严密的光学卫星相机在轨 MTF 检测方法,也是实验室用于相机成像质量评价的常用方法,可以直接获取表征遥感成像系统点扩散特性与成像质量的二维 PSF/MTF 并全面反映相机的成像能力。但是,针对光学卫星相机在轨 MTF 检测的自然点目标不易寻找。反射点源目标具有轻量化、小型化、自动化和高亮度的特点,其反射光谱与遥感卫星对地观测结果一致。2)方波法

根据 MTF 物理定义,利用辐射状靶标与具有相同反射率的大面积靶标遥感影像计算得到卫星相机像方调制度与物方调制度,进而得到遥感成像系统在奈奎斯特频率处的 MTF 值,通过结合地面准同步测量的靶标反射率,可以进一步获取大气 MTF 值与包含大气在内的成像链路总 MTF 值。但是方波法获取的光学卫星相机在轨 MTF 是成像系统的单点 MTF 值(奈奎斯特频率),不能全面表征系统成像特性。3)刃边法是光学卫星相机在轨 MTF 检测的常用方法,也是实验室进行相机质评的标准方法,较少依赖卫星相机的参数信息,能够获取遥感成像系统垂轨与沿轨两个方向的 MTF,但是该 MTF 无法完整地表征相机系统的二维点扩散特性。通过比较多种在轨 MTF 检测方法,可以消除检测方法的固有误差与系统偏差,进而全面客观地对光学卫星相机进行成像质量评价。

对于目前广泛应用于遥感的光电成像系统或数字图像来说,遥感影像是按照卫星相机的地面采样间隔对地面连续场景进行抽样,这种相对空间状态是不可知的,即相机的采样网格与地面场景或目标的相对位置关系具有随机性。因此,利用便于数学描述的点源、方波和刃边等特殊的点线面参照目标对光学卫星相机成像系统的像质参数 MTF 进行在轨检测时,为了克服相机探测器的采样效应,提高精度并准确获取光学卫星相机对地面参照目标响应的 PSF 或边扩散函数(ESF),需要对地面场景或目标影像进行亚像元采样或插值,获取相对连续的遥感相机成像系统的 PSF 或 ESF。采用非整数像素间隔阵列(点源法)、线宽呈梯形连续渐变(方波法)与

倾斜刃边夹角(刃边法)等方法,联合光学卫星相机多个探测元对地面场景或特殊点线面参照目标进行扫描成像^[2],通过亚像素级的峰值或刃边位置检测(或相对相位差)方法,获得亚像素插值的光学卫星相机成像系统的 PSF 或 ESF 估计,在抑制系统采样效应与随机噪声影响的同时,将遥感相机相对地面连续场景或目标的离散采样数据恢复为相对连续数据,尽可能准确地复原光学遥感成像系统的空间响应特性,提高了光学卫星相机在轨 MTF 检测精度。通过仿真分析与数值模拟^[14],采用非整数像素间隔的 4×4 反射点源阵列与倾斜角约为 7° 的刃边靶标,可以有效地增加采样数据点数量并抑制采样效应及噪声的影响;通过对系统 PSF 或 ESF 进行高精度的亚像素插值与模型拟合,提高遥感成像系统像质评价参数 MTF 的在轨检测精度。

卫星遥感成像与相机地面实验室成像不同,除受相机自身的成像系统影响外,还受星地间大气(湍流与散射)的影响。基于方波靶标(辐射状靶标)的光学卫星相机在轨 MTF 检测方法,利用大面积靶标的遥感影像直接获取光学卫星相机入瞳处的物方调制度,利用辐射状靶标遥感影像获取卫星相机的像方调制度,从而直接获取不含大气的光学卫星相机在轨 MTF 值,即系统在奈奎斯特频率处的 MTF 值,有效地克服了大气对遥感成像系统成像质量评价的影响。若结合地面实验现场同步或准同步获取的靶标地面调制度与基于大面积靶标遥感影像计算所得的卫星相机入瞳处的物方调制度,可以直接获取实验场区的大气 MTF 值。利用基于地面辐射状靶标反射率计算所得的靶标调制度与基于辐射状靶标遥感影像计算所得的卫星相机的像方调制度,可以直接获取包含大气在内的光学卫星相机全链路的在轨 MTF 值。但是这些在轨 MTF 值都是单点值,即系统在奈奎斯特频率处的 MTF 值,不能全面地表征系统的成像质量。另外,将辐射状靶标的地面布设参数与辐射状靶标遥感影像分析相结合,利用可分辨分界点的坐标与外边沿点坐标,可以解算得到光学卫星相机的地面像元分辨率。方波法采用具有相同反射率的辐射状靶标与大面积靶标,不但可以检测光学卫星相机的地面像元分辨率与系统在奈奎斯特频率处的 MTF 值,还可以获取实验场区的大气 MTF 值与成像系统全链路 MTF 值。

5 结 论

光学卫星相机的成像质量直接影响着遥感数据

的量化应用水平。针对 MTF 的在轨检测,以非整数像素间隔的反射点源阵列、线宽呈梯形连续渐变的辐射状靶标与含有倾斜刃边角度的大面积刃边靶标等便于数学描述的特殊点线面目标为参照,根据 MTF 物理含义进行遥感成像系统的像质评价。实验结果表明,点源法、方波法与刃边法等检测方法各有特点,MTF 检测结果具有较好的一致性,相对差异优于 6.00%。刃边法是卫星相机在轨 MTF 检测的常用方法;点源法与方波法是根据 MTF 定义进行直接检测,通过结合地面布设参数,可以准确获取光学卫星相机的地面像元分辨率。相对于点源法与刃边法,方波法能够直接获取相机在奈奎斯特频率处的 MTF 值,并在大面积靶标配合与地面同步测试的情况下,直接获取大气 MTF 值。相对于方波法与刃边法,点源法以轻小型自动化反射点源作为地面参照目标,可以直接获取表征成像系统自身点扩散特性的二维 PSF/MTF。通过结合高精度的像点量测算法,反射点源还可以作为高精度地面控制点,应用于高分辨率立体测绘卫星相机的在轨几何定标。

参 考 文 献

- [1] Zheng X B. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 2-8.
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(1): 2-8.
- [2] Schowengerdt R A. Remote sensing: models and methods for image processing [M]. 3rd ed. Cambridge: Academic Press, 2007.
- [3] Valorge C, Déliot P, Viallefont F, et al. On-orbit MTF assessment of satellite cameras [M]. London: Taylor & Francis Group, 2004: 67-76.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Choi T. IKONOS satellite on orbit modulation transfer function(MTF) measurement using edge and pulse method[D]. Vermillion : South Dakota State University, 2002.
- [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] 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.
- [9] 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, 1994, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE, 1994: 2010-2012.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Xu W W, Zhang L M, Li X, et al. On-orbit radiometric calibration of high-resolution optical remote sensing satellite based on sub-pixel targets [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1001001.
徐伟伟, 张黎明, 李鑫, 等. 基于亚像元目标的高分辨率光学遥感卫星在轨辐射定标方法[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1001001.
- [14] Xu W W. On-orbit MTF estimation of high resolution satellite optical sensor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
徐伟伟. 高分辨光学卫星传感器在轨 MTF 检测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.