第36卷 第7期
2016年7月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 36, No. 7
July, 2016

不含大气的在轨传递函数测试方法

李宪圣[1,2] 刘洪兴[2] 孙景旭[2] 任建岳[2] 薛常喜[1] 任建伟[2]

[1]长春理工大学光电工程学院，吉林 长春 130022

[2]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033

摘要 针对空间相机在轨传递函数因包含大气传递函数而难以客观反映空间相机成像性能的问题，依据靶标调制度、相机入瞳前的物方调制度、像方调制度这三种调制度之间的关系，提出了一种可准确测试大气传递函数和不含大气在轨传递函数的方法。利用该方法对空间相机进行测试，结果表明：实时的大气传递函数为0.762，含大气的沿轨传递函数为0.177，不含大气的沿轨传递函数为0.232。实验室测试的传递函数值与不含大气的沿轨传递函数值的相对误差为4.7%。

关键词 成像系统；在轨调制传递函数；大气调制传递函数；辐射定标；空间相机；三线靶标

中图分类号 V443;V445 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0711004

Measurement Method of On-Orbit Modulation Transfer Function Without Atmospheric Effect

Li Xiansheng[1,2] Liu Hongxing[2] Sun Jingxu[2] Ren Jianyue[2] Xue Changxi[1] Ren Jianwei[2]

[1] *College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

[2] *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract On-orbit modulation transfer function (MTF) of the space camera usually contains the MTF with atmospheric effect, and therefore it does not objectively reflect the imaging performance of the space camera. Based on the relationship among the modulation depth of the object target, the object target before the entrance pupil of space camera and the image, a novel technique is proposed to exactly test the atmospheric MTF and the on-orbit MTF without atmospheric effect. The test results of a space camera with the above measuring technique indicate that the real time atmospheric MTF is 0.762, the on-orbit MTF with atmosphere effect is 0.177, and the on-orbit MTF without atmospheric effect is 0.232. The relative error between the MTF value measured in the laboratory and the on-orbit MTF without atmospheric effect is 4.7%.

Key words imaging system; on-orbit modulation transfer function; atmospheric modulation transfer function; radiometric calibration; space camera; three-bar target

OCIS codes 110.2970; 120.0280; 110.4100; 110.3000

1 引 言

在轨调制传递函数(On-Orbit MTF，以下简称在轨传函)是评价空间光学遥感相机成像质量的关键指标之一[1-4]。光学遥感相机在发射前用于测试实验室静态传递函数[5]，在轨运行后用于测试动态在轨传函[6-7]，在轨传函是评价空间相机成像质量的最终指标。在轨测试中，空间相机的成像质量随着大气自身状

收稿日期：2015-12-31；收到修改稿日期：2016-03-22

基金项目：国家863计划(863-2-5-1-13B)

作者简介：李宪圣(1979—)，男，博士研究生，副研究员，主要从事光学遥感器辐射定标方面的研究。

E-mail: lixs688@163.com

导师简介：薛常喜(1979—)，男，博士，副教授，博士生导师，主要从事衍射光学、超精密光学加工及光学工程等方面的研究。E-mail: xcx272479@sina.com(通信联系人)

况的变化而变化，得到的图像反映了成像时刻大气和传感器的整体质量，因此计算得到的传函包含了大气的影响。扣除大气的在轨传函能客观反映空间相机自身的成像性能，对空间相机质量的评价更有意义。

目前空间相机在轨传函测试方法主要有刃边法、脉冲法、点源法和三线靶标法[6-10]。国外的 QuickBird、IKONOS[11]、ALI[12]、MODIS[13]和 OrbView-3 等卫星主要采用刃边法和脉冲法，并将测试结果应用到卫星图像中来提高卫星图像的质量。Rangaswamy 等[14]使用点源法测试在轨传函，其特点是使用反射镜阵列将太阳光反射到空间相机的 CCD 像元上来获得点源图像，利用点扩散函数来获得卫星的在轨传函。以上所测得的在轨传函都包含了大气因素。

三线靶标法是空间相机实验室静态传函测试的常用方法[15]，随着空间光学遥感相机的发展，地面像元分辨率逐步提高到亚米级，使用三线靶标法测试在轨传函逐步成为研究热点。此外，三线靶标的摆放角度与卫星飞行方向的切合精度已经达到较高水平，为利用三线靶标法测试在轨传函提供了技术保障。徐伟伟等[16-17]研究了基于三线靶标法的在轨传函测试方法，描述了三线靶标法的基本测试方法，测得了含大气的在轨传函，但是未能获得准确的大气传函。

本文利用低空间频率直角靶标和 Nyquist 频率三线靶标研究不含大气的在轨传函的测试方法，以理论推导和实验相结合的方式获得空间相机的在轨传函以及对应测试条件下的大气传函。

2 基本原理

2.1 空间相机的成像过程

空间相机的成像过程为：太阳光及天空背景光的辐射到达地球表面，经过地物反射、大气辐射传输、空间相机成像、卫星平台上的数据压缩、存储以及传输等过程到达地面接收系统，在地面图像数据被解压、重构而获得卫星图像。空间相机的成像链路包括地物、大气传输、光学系统、CCD 或 CMOS 图像传感器及电子学系统、数据压缩与存储、数据传输、数据接收与处理、图像重构、图像处理、显示器和人眼观测等环节[1]。根据卫星的成像过程将上述过程合并简化为地物、大气辐射传输、卫星和图像 4 部分，与之对应的传递过程如图 1 所示，其中 M_{obj} 为靶标调制度，$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm}}$ 为大气传函，$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{sat}}$ 为像方调制度与物方调制度的比值即卫星传函，M_{img} 为像方调制度。

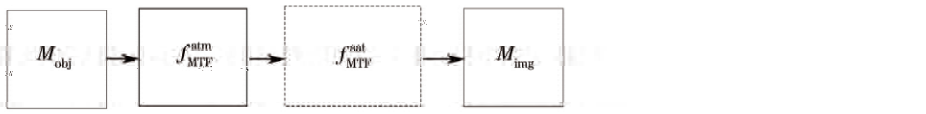

图 1 卫星传函示意图

Fig. 1 Schematic diagram of satellite MTF

测试在轨传函时，将地面靶标作为地物，根据实测的黑白靶标反射率或辐射亮度计算出的靶标调制度 M_{obj} 作为卫星在轨传函测试的输入条件。地面靶标在大气辐射传输过程中受到大气的散射、吸收、折射、扰动、偏振和程辐射等影响，靶标调制度到达相机入瞳处变为物方调制度 M_{W}，这种大气辐射传输引起调制度变化的函数称为大气传函 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm}}$。

地物辐射经过大气辐射传输到达空间相机入瞳处后，由光学系统成像到焦平面上，再由时间延迟积分电荷耦合器件（TDICCD）等图像传感器及电子学系统将地物辐射信息转换为图像数据，经卫星传输到地面接收系统，在地面图像数据被重构而获得卫星图像。利用 Nyquist 频率靶标图像获得像方调制度 M_{img}，像方调制度与物方调制度的比值称为卫星传递函数 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{sat}}$。卫星传函包含空间相机的光学系统传函、电子学系统传函、卫星平台振动传函以及图像压缩、存储、传输和重构等传函。

如果将地物和大气辐射传输合并考虑，计作相机入瞳前的物方调制度 M_{W}，即可获得不含大气的卫星传递函数 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{sat}}$，如图 2 所示。类似地，也可将将大气传函和卫星传函合并考虑，计作含大气的卫星传函 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm+sat}}$，如图 3 所示。

2.2 MTF 的数学模型

根据 MTF 的定义，当成像系统获得仅含有 Nyquist 频率正弦波靶标图像时，该频率处被测光学相机的

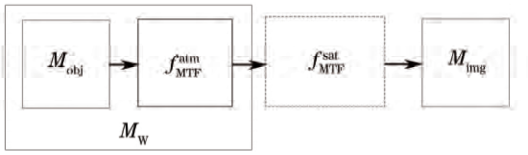

图 2 **不含大气的卫星传函**

Fig. 2 Satellite MTF without atmospheric effect

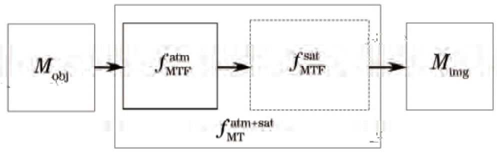

图 3 **含大气的卫星传函**

Fig. 3 Satellite MTF with atmospheric effect

MTF 可表示为像方调制度与物方调制度之比。在地面上难以铺设 Nyquist 频率正弦靶标，因此采用方形的周期靶标。由像方调制对比度除以靶标调制度，获得对比度传递函数(CTF)。MTF 表示对正弦波的响应，CTF 表示对方波的响应，二者之间的关系为[15-16]

$$f_{\mathrm{MTF}}(v)=\frac{\pi}{4}\times\left[f_{\mathrm{CTF}}(v)+\frac{f_{\mathrm{CTF}}(3v)}{3}-\frac{f_{\mathrm{CTF}}(5v)}{5}+\cdots\right], \tag{1}$$

忽略高次项，可得

$$f_{\mathrm{MTF}}(v)=\frac{\pi}{4}\times f_{\mathrm{CTF}}(v)=\frac{\pi}{4}\times\frac{M_{\mathrm{img}}}{M_{\mathrm{obj}}}。 \tag{2}$$

靶标调制度 M_{obj} 到像方调制度 M_{img} 的传递关系如图 1 所示，二者的关系为

$$M_{\mathrm{obj}}\times f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm}}\times f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{sat}}=\frac{\pi}{4}\times M_{\mathrm{img}}, \tag{3}$$

由(3)式可得到含大气的卫星传函 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm+sat}}$ 和不含大气的卫星传函 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{sat}}$，即

$$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm+sat}}=f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm}}\times f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{sat}}=\frac{\pi}{4}\times\frac{M_{\mathrm{img}}}{M_{\mathrm{obj}}}, \tag{4}$$

$$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{sat}}=\frac{\pi}{4}\times\frac{M_{\mathrm{img}}}{M_{\mathrm{obj}}\times f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm}}}=\frac{\pi}{4}\times\frac{M_{\mathrm{img}}}{M_{\mathrm{W}}}, \tag{5}$$

同时得到大气传函 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm}}$ 的计算公式为

$$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm}}=\frac{f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm+sat}}}{f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{sat}}}=\frac{M_{\mathrm{W}}}{M_{\mathrm{obj}}}。 \tag{6}$$

3 在轨 MTF 测试方法

3.1 测试装置

MTF 测试装置如图 4 所示，由低空间频率直角靶标和 Nyquist 频率三线靶标组成。直角靶标由大白靶标 A 和大黑靶标 B 组成，大白靶标和大黑靶标的长和宽均大于 20 倍的地面像元分辨率(GSD)。Nyquist 频率三线靶标由 5 个组件组成，每个组件由 4 个黑靶条和 3 个白靶条组成，每个黑靶条和白靶条的宽度为 1 倍

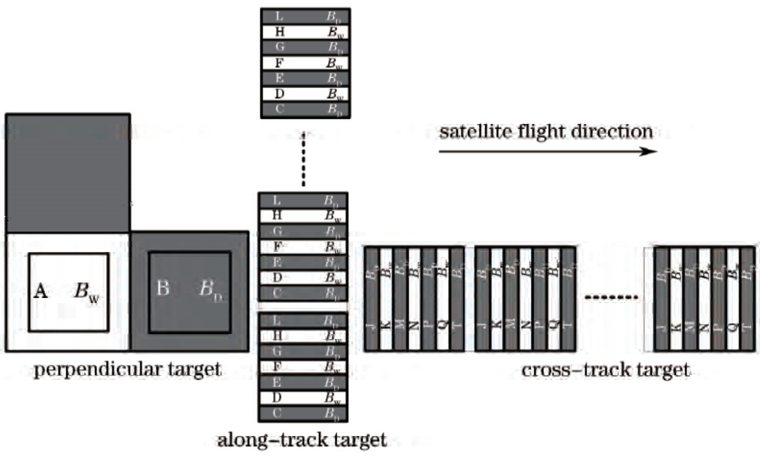

图 4 **MTF 测试装置示意图**

Fig. 4 Schematic diagram of MTF measurement setup

GSD，长度大于10倍GSD，组件之间的间距为0.8倍GSD，因此形成的内错靶标为0.2倍GSD，这种结构可提高空间相机像元与沿轨靶条对齐的概率并减小测试误差。适当地增加靶标的组件数，减少组件之间的距离，可提高测试的准确性。根据Nyquist频率靶标铺设的方向与卫星飞行方向的关系，将Nyquist频率靶标分为沿轨频率靶标和垂轨频率靶标，分别用于两个方向的传函测试。地面靶标中的黑靶标B的反射率小于5%，白靶标A的反射率在60%左右，且在空间相机的光谱响应范围内的反射率曲线均较为平坦。

3.2 测试方法

使用卫星工具包(STK)软件计算卫星过顶时的飞行方向，并依据计算结果，按图4所示的方式或其等效方式铺设靶标。沿轨Nyquist频率三线靶标与卫星飞行的方向平行，垂轨Nyquist频率三线靶标与卫星飞行的方向垂直。在铺设地面靶标时，使用全球定位系统-载波相位差分技术(GPSRTK)进行精确测试，以保证靶标摆放角度与卫星飞行方向的切合精度。为了获得较高的信噪比，应在晴朗无云的条件下进行在轨传函测试。

3.2.1 地面靶标调制度的计算

卫星过顶时，通过靶标区的时间非常短，在这么短的时间内辐射亮度的测试难以完成，因此常采用靶标的光谱反射率来计算靶标调制度。测试靶标采用特殊材料制作，光谱反射率曲线近似平坦，黑靶标的光谱反射率 $\rho_D(\lambda)\approx\rho_D$，白靶标的反射率 $\rho_W(\lambda)\approx\rho_W$。在卫星过顶时刻，白靶标的辐亮度 B_W 和黑靶标的辐亮度 B_D 分别为

$$B_W=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{E(\lambda)\times\rho_W(\lambda)}{\pi}d\lambda\approx\rho_W\times\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{E(\lambda)}{\pi}d\lambda,\tag{7}$$

$$B_D=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{E(\lambda)\times\rho_D(\lambda)}{\pi}d\lambda\approx\rho_D\times\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{E(\lambda)}{\pi}d\lambda,\tag{8}$$

其中 $E(\lambda)$为太阳光和天空光到达地面的光谱辐照度，λ_1 和 λ_2 分别为空间相机的光谱响应起止波长。

由(7)、(8)式得到靶标调制度为

$$M_{obj}=\frac{B_W-B_D}{B_W+B_D}\approx\frac{\rho_W-\rho_D}{\rho_W+\rho_D}。\tag{9}$$

3.2.2 相机入瞳前的物方调制度计算

在轨传函测试时，大气光谱透射率为 $\tau(\lambda)$，大气散射光谱辐射亮度为 $B_{SCAT}(\lambda)$，白靶标到达相机入瞳处的辐射亮度为 L_W，黑靶标到达相机入瞳处的辐射亮度为 L_D。大气后向散射积分辐射亮度为 B_{SCAT}，由(7)、(8)式及大气辐射传输关系可得到白、黑靶标到达相机入瞳处的辐射亮度，即

$$L_W=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\left[\frac{E(\lambda)\times\rho_W(\lambda)}{\pi}\times\tau(\lambda)+B_{SCAT}(\lambda)\right]d\lambda=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{E(\lambda)\times\rho_W(\lambda)}{\pi}\times\tau(\lambda)\,d\lambda+\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{SCAT}(\lambda)d\lambda=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_W(\lambda)\times\tau(\lambda)\,d\lambda+B_{SCAT},\tag{10}$$

$$L_D=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\left[\frac{E(\lambda)\times\rho_D(\lambda)}{\pi}\times\tau(\lambda)+B_{SCAT}(\lambda)\right]d\lambda=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{E(\lambda)\times\rho_D(\lambda)}{\pi}\times\tau(\lambda)\,d\lambda+\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_{SCAT}(\lambda)d\lambda=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}B_D(\lambda)\times\tau(\lambda)\,d\lambda+B_{SCAT}。\tag{11}$$

由于大气光谱透射率 $\tau(\lambda)$和大气散射光谱辐射亮度 $B_{SCAT}(\lambda)$与当时的大气状况相关，在地面上无法准确测试，因此不能获得准确值。利用空间相机为线性响应系统的特点，采用低空间频率的直角靶标图像数据，可以获得入瞳前的辐射亮度。

空间相机属于典型的辐射亮度成像系统，其实验室的辐射定标采用积分球辐射定标光源，图像传感器采用TDICCD，相机获得的输出图像灰度值 x_i^{DN} 与相机入瞳前的输入辐射亮度 L 的响应关系为

$$x_i^{\mathrm{DN}}=R_i \times L, \tag{12}$$

式中 R_i 为空间相机第 i 号像元的辐射响应度，L 为相机入瞳前的辐射亮度。

如图 4 所示，利用空间相机对地面的直角靶标进行成像时，直角靶标中白靶标内的 A 区和黑靶标内的 B 区在空间上对应的相机空间频率近似为 0，空间相机在零空间频率上的传函等于 1。A 区和 B 区使用序号相连的像元进行成像，令该区域对应像元的平均辐射响应度为 R；利用直角靶标中白靶标内 A 区的平均灰度值 $x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}$ 和黑靶标内 B 区的平均灰度值 $x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}$，由(12)式可以得到白靶标 A 区的平均辐射亮度 L_{W} 和黑靶标 B 区的平均辐射亮度 L_{D}，即

$$L_{\mathrm{W}}=x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}/R, \tag{13}$$

$$L_{\mathrm{D}}=x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}/R, \tag{14}$$

由(13)式和(14)式可得空间相机入瞳前的物方调制度 M_{W}，即

$$M_{\mathrm{W}}=\frac{L_{\mathrm{W}}-L_{\mathrm{D}}}{L_{\mathrm{W}}+L_{\mathrm{D}}}=\frac{x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}-x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}}{x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}+x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}}。 \tag{15}$$

3.2.3　像方调制度的计算方法

在 Nyquist 频率三线靶标图像中，利用相邻白靶条与黑靶条的图像灰度值，计算相机垂轨像方调制度 $M_{\mathrm{img}}^{\mathrm{V}}$ 和沿轨像方调制度 $M_{\mathrm{img}}^{\mathrm{H}}$，即

$$M_{\mathrm{img}}^{\mathrm{V}}=\frac{x_{\mathrm{VW}}^{\mathrm{DN}}-x_{\mathrm{VD}}^{\mathrm{DN}}}{x_{\mathrm{VW}}^{\mathrm{DN}}+x_{\mathrm{VD}}^{\mathrm{DN}}}, \tag{16}$$

$$M_{\mathrm{img}}^{\mathrm{H}}=\frac{x_{\mathrm{HW}}^{\mathrm{DN}}-x_{\mathrm{HD}}^{\mathrm{DN}}}{x_{\mathrm{HW}}^{\mathrm{DN}}+x_{\mathrm{HD}}^{\mathrm{DN}}}, \tag{17}$$

式中 $x_{\mathrm{VW}}^{\mathrm{DN}}$ 和 $x_{\mathrm{VD}}^{\mathrm{DN}}$ 分别为沿轨靶标图像中相邻白靶条和黑靶条的图像灰度值，$x_{\mathrm{HW}}^{\mathrm{DN}}$ 和 $x_{\mathrm{HD}}^{\mathrm{DN}}$ 分别为垂轨靶标图像中相邻白靶条和黑靶条的图像灰度值。

3.2.4　不含大气的卫星传函

利用(5)、(15)～(17)式，分别获得不含大气的垂轨传函和沿轨传函，即

$$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{V(sat)}}=\frac{\pi}{4}\times\frac{M_{\mathrm{img}}^{\mathrm{V}}}{M_{\mathrm{W}}}, \tag{18}$$

$$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{H(sat)}}=\frac{\pi}{4}\times\frac{M_{\mathrm{img}}^{\mathrm{H}}}{M_{\mathrm{w}}}。 \tag{19}$$

3.2.5　含大气的卫星传函

利用(4)、(9)、(16)、(17)式，可以计算相机含大气的垂轨传函和沿轨传函 ，即

$$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{V(atm+sat)}}=\frac{\pi}{4}\times\frac{M_{\mathrm{img}}^{\mathrm{V}}}{M_{\mathrm{obj}}}, \tag{20}$$

$$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{H(atm+sat)}}=\frac{\pi}{4}\times\frac{M_{\mathrm{img}}^{\mathrm{H}}}{M_{\mathrm{obj}}}。 \tag{21}$$

3.2.6　大气传函的计算方法

利用实测靶标的反射率和(9)式可获得靶标调制度，由(15)式获得相机入瞳处物方调制度，再利用(6)式获得大气传函 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm}}$。

4　实验结果

使用该方法对某光学遥感相机进行了在轨传函测试。将地面靶标摆放在广阔的草地上，依据 STK 软件来计算卫星过顶时的飞行轨道，进而选择地面靶标的铺设方向。

4.1　靶标调制度的测试结果

使用光谱辐射计(GER1500，SVC 公司，美国)来测试黑、白靶标的光谱反射率曲线，分别如图 5、6 所示。测试结果表明，白靶标的平均反射率 $\rho_{\mathrm{W}}=63\%$，黑靶标的平均反射率 $\rho_{\mathrm{D}}=4.4\%$。由(9)式可计算靶标调制度，即

$$M_{\mathrm{obj}}=\frac{\rho_{\mathrm{W}}-\rho_{\mathrm{D}}}{\rho_{\mathrm{W}}+\rho_{\mathrm{D}}}=\frac{63.0\%-4.4\%}{63.0\%+4.4\%}=0.869。 \tag{22}$$

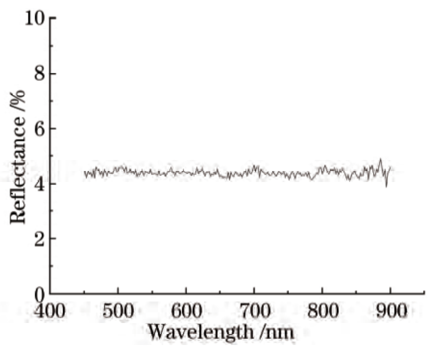

图 5　黑靶标的光谱反射率曲线

Fig. 5　Spectral reflectance curve of black target

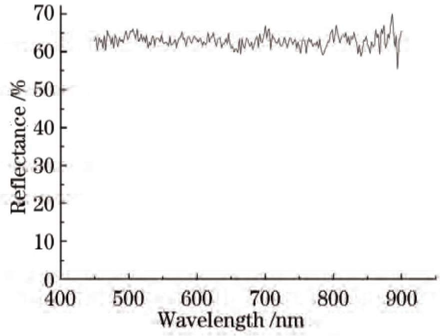

图 6　白靶标的光谱反射率曲线

Fig. 6　Spectral reflectance curve of white target

4.2　相机入瞳前物方调制度测试结果

靶标卫星图像如图 7 所示，图 7 中右图为直角靶标的放大图，在直角靶标中白靶标内 A 区域的平均灰度值 $x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}=1005$，黑靶标内 B 区域的平均灰度值 $x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}=204$，由(15)式可获得相机入瞳前的物方调制度，即

$$M_{\mathrm{W}}=\frac{x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}-x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}}{x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}+x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}}=\frac{1005-204}{1005+204}=0.662, \tag{23}$$

由(6)、(22)、(23)式获得大气传函

$$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{atm}}=\frac{M_{\mathrm{W}}}{M_{\mathrm{obj}}}=\frac{0.662}{0.869}=0.762。 \tag{24}$$

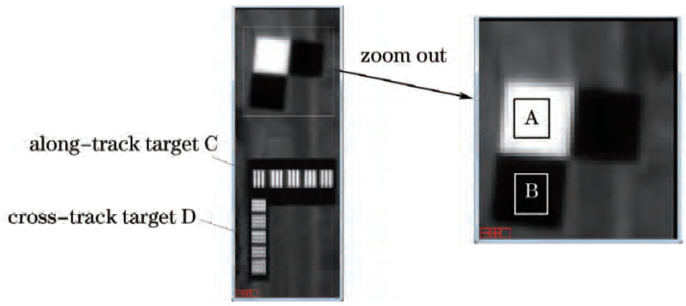

图 7　靶标图像

Fig. 7　Target image

4.3　卫星传函的计算结果

使用三线靶标中的沿轨 C 组靶标和垂轨 D 组靶标，分别计算两个方向上的像方调制度。

利用沿轨 C 组靶标中的图像数据，以及(5)、(16)、(18)、(20)、(22)、(23)式，计算沿轨的不含大气的卫星传函 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{H(sat)}}$ 和含大气的卫星传函 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{H(atm+sat)}}$，计算结果如表 1 所示。利用垂轨 D 组靶标中的图像数据，以及(4)、(17)、(19)、(21)～(23)式，计算垂轨的不含大气的卫星传函 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{H(sat)}}$ 和含大气的卫星传函 $f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{H(atm+sat)}}$，计算结果如表 2 所示。

表 1　沿轨 C 组靶标图像灰度值和传函计算结果

Table 1　Image gray and MTF in along-track target C group

Image gray					$M_{\mathrm{img}}^{\mathrm{H}}$	Along-track MTF	
$x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}$	$x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}$	$x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}$	$x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}$	$x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}$		$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{H(sat)}}$	$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{H(atm+sat)}}$
652	441	658	441	649			
660	451	669	452	659	0.195	0.231	0.176
670	461	681	462	671	0.192	0.228	0.174
668	461	683	462	667	0.194	0.230	0.175
666	462	686	461	662	0.195	0.231	0.176
656	445	670	451	650	0.201	0.239	0.182
645	428	654	441	637			
Mean MTF						0.232	0.177

表 2　垂轨 D 组靶标图像灰度值及传函计算结果

Table 2　Image gray and MTF in cross-track target D group

Image gray					$M_{\mathrm{img}}^{\mathrm{V}}$	Cross-track MTF	
$x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}$	$x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}$	$x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}$	$x_{\mathrm{D}}^{\mathrm{DN}}$	$x_{\mathrm{W}}^{\mathrm{DN}}$		$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{V(sat)}}$	$f_{\mathrm{MTF}}^{\mathrm{V(atm+sat)}}$
600	505	627	502	594			
608	517	635	512	599	0.107	0.127	0.097
612	525	640	519	599	0.104	0.124	0.094
606	517	630	511	594	0.104	0.124	0.094
618	525	641	520	608	0.104	0.124	0.094
620	521	641	526	614			
Mean MTF						0.125	0.095

由表 1 和表 2 可知，本次实验的大气传函为 0.762。不含大气的沿轨和垂轨传函分别为 0.232 和 0.125，含大气的沿轨和垂轨传函分别为 0.177 和 0.095。

4.4　不含大气的在轨传函测试的影响分析

4.4.1　靶标反射率对测试结果的影响

不含大气在轨传函测试方法主要利用接近于零空间频率的大白和大黑直角靶标来获得相机入瞳前的物方调制度，使用 Nyquist 频率的三线靶标来获得像方调制度。考虑到天气、卫星回归周期等因素，完成空间相机的在轨 MTF 测试任务一般需要 50 天左右，测试装置中所有的靶标为同一批次的靶标，所有的直角靶标和三线靶标均铺设在野外，在相同时间内经历了相同的自然条件，所引起的靶标的微小变化也是相同的，且在卫星过顶时，均进行靶标反射率测试。经测试，直角靶标和三线靶标中白靶标的反射率差别小于0.5%，黑靶标反射率无差别。在进行 MTF 测试时，直角靶标和三线靶标均处在相同的大气条件下，且整个靶标的成像时间在 0.2 s 之内，因此大气对直角靶标和三线靶标的影响是相同的。

4.4.2　直角靶标尺寸对测试结果的影响

直角靶标中大白靶标和大黑靶标的长和宽均为 20 倍 GSD，而在使用过程中，仅分别采用大白靶标和大黑靶标中心 10 pixel ×10 pixel 的像元区域。根据图像数据计算结果，像元灰度值的变化量小于 0.3%，即所选取的 A 区和 B 区的图像较均匀，满足测试要求。

4.4.3　其他因素对测试结果的影响

在测试过程中，卫星的偏流和振动、卫星运行的轨道以及三线靶标铺设的方向等对测试结果都有影响。在 MTF 测试前，依据卫星的飞行参量，使用 STK 软件计算卫星过顶时刻的轨道参数，并计算出三线靶标的铺设方向及靶条的宽度，使用 GPSRTK 进行精确测试定位后，铺设三线靶标，铺设精度优于 0.2%。

相机发射前在实验室使用三线靶标分辨率板和平行光管来测试静态传函，实验室的大气对传函的测试结果有一定的影响，本相机的实验室静态传函测试结果为 0.221。而在本次在轨 MTF 实验中，不含大气的沿轨传函为 0.232，二者的相对误差为 4.7%。如果能扣除实验室静态传函中大气的影响，相对误差会更小。

综合以上因素，不含大气的在轨传函测试精度优于 4.8%。

5　结　论

研究了大气传函和空间相机的不含大气在轨传函的测试方法，将低空间频率的直角靶标和 Nyquist 频率三线靶标作为地面靶标，并利用实测的地面靶标反射率获得地面靶标调制度，利用直角黑白靶标图像数据、辐射定标响应度、零空间频率空间相机调制传递函数约为 1 的条件获得了相机入瞳前的物方调制度，利用 Nyquist 频率三线靶标图像数据获得像方调制度。利用这三个调制度之间的关系，计算出当时的大气传函和不含大气的在轨传函。通过该方法获得了准确的大气传函，解决了在地面上难以测试大气传函的问题，同时获得了不含大气的在轨传函。不含大气的在轨传函客观反映了空间相机的成像性能和质量，更有利于在轨图像的优化和图像质量的进一步提高。

参　考　文　献

1　Han Changyuan. Performance optimization of electro-optical imaging systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 1-9.

韩昌元. 光电成像系统的性能优化[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(1): 1-9.

2 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.

3 Li Haiwei, Zhang Hao, Chen Zhengchao, *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.

4 Yuan Li, Zhang Xiaohui, Liu Zhenjiang, *et al*.. Developing of portable modulation transfer function tester[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1111001.

袁　理, 张晓辉, 刘振江, 等. 便携式调制传递函数测试仪的研制[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1111001.

5 Lü Hengyi, Xue Xucheng, Zhao Yunlong, *et al*.. Measurement and experiment of modulation transfer function at Nyquist frequency for space optical cameras[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1484-1489.

吕恒毅, 薛旭成, 赵云隆, 等. 空间光学相机在乃奎斯特频率处的调制传递函数测试与实验[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(5): 1484-1489.

6 Li Xiansheng, Ren Jianwei, Ren Jianyue, *et al*.. Method and device for testing in-orbit dynamic transfer function of space camera: CN102162739 B[P]. 2012-11-07.

李宪圣, 任建伟, 任建岳, 等. 空间相机在轨动态传函测试方法及装置: CN102162739 B[P]. 2012-11-07.

7 Sun Jijuan, Min Xiangjun, Gu Yingqi, *et al*.. The linear feature based on-orbit MTF estimation and image restoration of mid resolution space remote sensor[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2006, 27(2): 28-33.

孙吉娟, 闵祥军, 顾英圻, 等. 基于线性特征的中分辨率航天遥感器 MTF 在轨评价及其在图像恢复中的应用[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(2): 28-33.

8 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.

9 Xu Baoshu, Shi Zelin, Feng Bin. Modulation transfer function measurement method of electro-optical imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1111004.

徐保树, 史泽林, 冯　斌. 一种光电成像系统调制传递函数的测量方法[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1111004.

10 Chen Qihang, He Bin, Wang Junqi. Optimal extraction for edge spread function in knife-edge method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 111003.

陈起行, 何　斌, 王俊琦. 刃边法边缘扩散函数最优提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 111003.

11 Ryan R, Baldridge B, Schowengerdt R A, *et al*.. IKONOS spatial resolution and image interpretability characterization [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(1-2): 37-52.

12 Hearn D R. Spatial calibration and imaging performance assessment of the advanced land imager[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2005, 15(2): 225-250.

13 Rojas F, Schowengerdt R A, Biggar S F. Early results on the characterization of the Terra MODIS spatial response[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2): 50-61.

14 Rangaswamy M K. Quickbird II: Two-dimensional on-orbit modulation transfer function analysis using convex mirror array[D]. Brookings: South Dakota State University, 2003: 30-64.

15 Boreman G D, Yang S. Modulation transfer function measurement using three- and four-bar targets[J]. Applied Optics, 1995, 34(s): 8050-8052.

16 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. 高分辨率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.

17 Wang Qi, Li Xianbin, Li Xiaohui, *et al*.. A research on MTF for on-orbit estimation and accuracy analysis based on three-bar method[J]. Remote Sensing Information, 2011 (1): 14-21.

王　琦, 李显彬, 李晓辉, 等. 基于三线靶标法的在轨 MTF 评价方法及其精度分析研究[J]. 遥感信息, 2011 (1): 14-21.