

基于三线靶标的红外遥感卫星相机在轨MTF检测方法

钱坤 徐伟伟 司孝龙 黄文薪 张黎明 李佳伟 杨宝云

On-orbit MTF evaluation of infrared spaceborne cameras based on three-bar target patterns

QIAN Kun, XU Weiwei, SI Xiaolong, HUANG Wenxin, ZHANG Liming, LI Jiawei, YANG Baoyun

引用本文:

钱坤, 徐伟伟, 司孝龙, 等. 基于三线靶标的红外遥感卫星相机在轨MTF检测方法[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1083–1089. DOI: 10.5768/JAO202546.0503003

QIAN Kun, XU Weiwei, SI Xiaolong, et al. On-orbit MTF evaluation of infrared spaceborne cameras based on three-bar target patterns[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1083–1089. DOI: 10.5768/JAO202546.0503003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0503003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

EBAPS的调制传递函数测试系统

Modulation transfer function testing system for EBAPS

应用光学. 2024, 45(5): 992–1000 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0503001>

应用波像差理论计算Kirkpatrick-Baez系统的调制传递函数

Calculating MTF of Kirkpatrick-Baez system by wave aberration theory

应用光学. 2020, 41(5): 904–910 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501005>

可见光电视摄像机整机MTF测量装置及方法

Measurement device and method of MTF for visible TV camera

应用光学. 2020, 41(1): 134–139 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0103001>

城市夜光遥感相机成像质量分析

Imaging quality analysis of urban luminous remote sensing camera

应用光学. 2025, 46(3): 703–708 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0304003>

基于卫星高光谱遥感的水体和林木面积测绘

Area mapping for water and forest based on satellite hyper-spectral remote sensing

应用光学. 2022, 43(5): 886–892 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0502002>

基于MCRASN的遥感影像变化检测

Remote sensing images change detection based on MCRASN

应用光学. 2024, 45(2): 430–437 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1083-07

引用格式: 钱坤, 徐伟伟, 司孝龙, 等. 基于三线靶标的红外遥感卫星相机在轨 MTF 检测方法 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1083-1089.

QIAN Kun, XU Weiwei, SI Xiaolong, et al. On-orbit MTF evaluation of infrared spaceborne cameras based on three-bar target patterns[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1083-1089.



在线阅读

基于三线靶标的红外遥感卫星相机 在轨 MTF 检测方法

钱 坤^{1,2}, 徐伟伟², 司孝龙², 黄文薪², 张黎明², 李佳伟², 杨宝云²

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院 光学定量遥感
安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 调制传递函数是红外遥感卫星像质评价的核心参数, 但其在轨检测面临靶标温差稳定性不足与数据处理复杂两大挑战。提出一种基于三线靶标与温阶靶标协同的在轨调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 直接检测方法, 通过靶标设计与模糊 PID (proportional-integral-derivative) 温控算法, 实现靶标温度均匀性 ($<0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)、稳定性 ($\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) 与重复性 ($>99\%$) 的良好表现。基于傅里叶光学理论与辐射传输模型, 结合“物方-像方调制度分离”计算原理, 从遥感影像中直接提取奈奎斯特频率处 MTF 值, 避免了传统方法中大气因素、数值微分以及参数拟合误差等对 MTF 检测的影响, 为高分辨率红外卫星定量化应用提供了高精度技术支撑。

关键词: 遥感; 调制传递函数; 三线靶标法; 像质评价方法; 红外遥感卫星

中图分类号: O434.3

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0503003

On-orbit MTF evaluation of infrared spaceborne cameras based on three-bar target patterns

QIAN Kun^{1,2}, XU Weiwei², SI Xiaolong², HUANG Wenxin², ZHANG Liming²,
LI Jiawei², YANG Baoyun²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of
Optical Quantitative Remote Sensing, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of
Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: MTF(modulation transfer function) serves as a critical parameter for imaging quality evaluation of infrared remote sensing satellites; however, its on-orbit detection faces two major challenges: insufficient thermal stability of calibration targets and complexity in data processing. This study proposed a direct on-orbit MTF detection method utilizing the synergistic three-bar and temperature-step targets. Through the target optimized design and fuzzy PID (proportional-integral-derivative) temperature control algorithm, the targets could achieve temperature uniformity ($<0.5^{\circ}\text{C}$), stability ($\pm 0.6^{\circ}\text{C}$), and operational repeatability ($>99\%$). By integrating Fourier optics theory and radiative transfer modeling with the computational principle of "object-image modulation separation", MTF values could be directly extracted at Nyquist frequency from remote sensing imagery. This approach could effectively eliminate errors caused by atmospheric interference,

收稿日期: 2025-02-10; 修回日期: 2025-03-11

基金项目: 十三·五航天预研基金 (GFZX0401430407)

第一作者: 钱坤, E-mail: 529521790@qq.com

通信作者: 徐伟伟, E-mail: weilxu@aiofm.ac.cn

numerical differentiation, and parameter fitting inherent in conventional methods, providing high-precision technical support for quantitative applications of high-resolution infrared satellite systems.

Key words: remote sensing; modulation transfer function; three-bar target method; image quality evaluation method; infrared remote sensing satellite

引言

红外遥感是一种利用红外辐射进行观测和数据获取的遥感技术,采用红外相机接收和记录地气系统的辐射温度,具有不受光照限制、观测隐蔽目标、大范围观测等优点,对于研究地气系统热力学特性及物体红外辐射特征具有重要意义^[1],在生态环境监测、数字天气预报、自然资源管理、防灾减灾及军事侦察等军民两用领域有着广阔的应用前景,因此,对遥感卫星的成像质量提出了更高的要求^[2]。作为红外遥感卫星像质评价的核心量化指标,调制传递函数(modulation transfer function, MTF)通过频域响应特性反映成像系统对地物细节的再现精度,其数值直接关联卫星影像中小尺度目标辨识与微弱特征识别的能力水平^[3]。当前在轨 MTF 检测技术通常基于遥感卫星相机的物像传递模型,通过构建参考目标的物理特性与其影像频谱之间的数学关系,借助傅里叶频域解析算法,最终推导出表征系统成像质量的 MTF 特征参数^[4]。尽管在发射前红外遥感卫星相机都进行了严格的实验室定标与测试,但是转运过程与发射的震动及加速度、运行环境(应力及调焦、温度梯度及紫外辐照等)、探测器温度控制及老化等因素都会对红外遥感卫星相机系统产生影响^[5]。针对红外遥感卫星全任务周期内数据质量的可靠性保障要求,需要对在轨辐射定标、MTF 与光谱特性等系统参数进行多角度验证,确保从原始数据获取到高级产品生成的整个信息链条,以满足定量化应用需求^[6]。传统的实验室检测方法虽在受控环境下具有较高精度,但难以模拟在轨动态条件^[7-8]。国际上,SLATER P N^[9]提出的辐射传输模型为卫星定标奠定了理论基础,SILVA D^[10]探讨了红外遥感卫星相机 MTF 测量技术,FOX M^[11]通过可控地面阵列验证了在轨定标方法的可行性。现有在轨检测手段(如倾斜刃边法、自然脉冲目标法)多依赖湖泊边缘、道路等自然地物作为靶标,其温差分布不均^[12]、背景辐射不可控等缺陷导致计算误差显著。例如,SDGSAT-1 卫星采用倾斜刃边法时,因自然刃边目标的温度梯度波动,MTF 检测误差

超过 4.5%^[13];FY-2 卫星依赖线状脉冲目标时,受背景噪声的影响,分辨率评估结果存在着较大偏差^[14-15]。这些基于自然地物的大面积刃边目标或线状脉冲目标因均匀性与高低温差等因素不可控,获取的 MTF 与温度分辨率等像质评价参数精度受限^[16-17],而基于红外人工靶标的刃边目标均匀性与温差可人为调控,能够提高像质评价参数精度,但是红外人工靶标又不易大面积研制与在轨检测应用。刃边法 MTF 检测精度易受噪声及其固有偏差影响,例如其很大程度上依赖刃边响应的边扩散函数拟合来抑制噪声,随之带来参数化模型的准确性问题,额外的数值微分及数据处理过程也会引入一定误差^[18]。

为解决现有红外参考目标与在轨 MTF 检测方法的不足,本文在用于遥感卫星相机分辨率检测的三线靶标基础上,提出使用主动加热式红外三线靶标与大面积红外温阶靶标协同部署的在轨 MTF 直接检测方法。通过结合傅里叶光学理论与辐射传输模型,构建了物方调制度与像方调制度的分离计算模型,直接从遥感影像中提取奈奎斯特频率处的 MTF 值,避免了传统方法中复杂的数值微分与边扩散函数拟合过程,提高了红外遥感卫星相机在轨调制传递函数检测精度。

1 基本原理

1.1 MTF 与 CTF

根据 MTF 定义和相机成像系统物像关系,当含有某种频率的正弦波靶标输入成像系统时,该频率处光学相机的 MTF 可表示为靶标图像的像方调制度与物方调制度之比^[19]:

$$MTF(v) = \frac{M_{\text{output}}(v)}{M_{\text{input}}(v)} \quad (1)$$

式中:调制度 $M = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}})$, I_{max} 与 I_{min} 分别为最大、最小光强。

设计并使用不同空间频率的正弦波靶标作为红外遥感卫星相机的输入,获取靶标图像并以相机像方与物方调制度来得到成像系统的 MTF。虽然理想状态下应使用正弦波靶标进行 MTF 检测,

但在工程实践中,特别是针对红外波段的特殊需求,正弦靶标面临显著的工艺实现难题。相较之下,采用周期方波靶标,因其制备工艺成熟、物理结构可控性强等优势,在工程应用中展现出更高的可行性。因此,可通过配置具备梯度热特征分布的红外靶标,依据红外遥感卫星相机空间频率特性构建周期性红外方波靶标,实现成像系统在轨 MTF 的定量化评测。成像系统将方波靶标输入响应的像方调制度与物方调制度之比作为对比度传递函数 (contrast transfer function, CTF),即被测红外遥感卫星相机的 CTF 定义为

$$CTF(v) = \frac{M_{\text{image}}}{M_{\text{object}}} \quad (2)$$

式中: M_{image} 与 M_{object} 为周期方波靶标的像方调制度与物方调制度。

将方波按照傅里叶级数展开可知,周期方波靶标包含多种频率的正弦波靶标,且 MTF 与 CTF 之间存在以下关系^[18,20]:

$$MTF(v) = \frac{\pi}{4} \left[CTF(v) + \frac{1}{3}CTF(3v) - \frac{1}{5}CTF(5v) + \frac{1}{7}CTF(7v) \cdots \right] \quad (3)$$

由公式(3)可知,MTF 由多种频率成分的 CTF 组成。但是对于广泛应用于遥感的光电成像系统来说,采用线阵推扫模式工作的红外遥感卫星相机,其探测器离散采样特性遵循香农采样定理约束,导致成像数据中仅能保留空间频率低于奈奎斯特频率(对应两倍像元周期)的信号成分。该现象是由于探测器像元离散化采样过程引发的频率混叠抑制效应,使得超出系统采样带宽的高频信息在模数转换阶段被自动滤除。故按照空间分辨率相间组成的红外方波靶标经遥感卫星探测器采样后,仅保留奈奎斯特频率成分。则红外遥感卫星相机的 MTF 可表示为

$$MTF(v_N) = \frac{\pi}{4}CTF(v_N) \quad (4)$$

式中, v_N 为奈奎斯特频率。

由此可见,按照红外遥感卫星地面像元分辨率设置在轨检测三线靶标时,能够代替正弦波靶标进行在轨 MTF 检测,特别是可获取奈奎斯特频率处调制传递函数值。

1.2 在轨 MTF 检测

卫星对地观测成像与实验室成像过程不同,需要考虑大气层存在的影响。由辐射传输理论可

知,红外遥感卫星的入瞳辐亮度可表示为^[9]

$$L = \tau L_t + L_{\text{up}} \quad (5)$$

式中: τ 为靶标与卫星遥感器之间的大气透过率; L_t 为靶标测量辐射亮度; L_{up} 为大气路径辐射。

红外遥感卫星相机对于三线方波靶标的物方调制度可表示为

$$M = \frac{\tau(L_{t,h} - L_{t,l})}{\tau(L_{t,h} + L_{t,l}) + 2L_{\text{up}}} \quad (6)$$

式中: $L_{t,h}$ 和 $L_{t,l}$ 分别为高、低温靶标的测量辐射亮度。

三线方波靶标的物方调制度依赖于地面同步测量靶标出射辐亮度与大气透过率参数,并进行辐射传输建模推导,呈现辐射效应。该过程易受测量设备标定误差与大气参数反演不确定性的双重影响。本文提出可铺设同材质大面积红外温阶靶标协同观测,通过直接读取温阶靶标遥感影像响应值来计算物方调制度,即:

$$M_0 = \frac{DN_{0,h} - DN_{0,l}}{DN_{0,h} + DN_{0,l}} \quad (7)$$

式中: $DN_{0,h}$ 与 $DN_{0,l}$ 为大面积红外温阶靶标高、低辐射区在扣除暗电流后的响应值。

由三线方波靶标遥感影像响应值得像方调制度,进而与大面积温阶靶标协同可得红外遥感卫星奈奎斯特频率处 MTF 值,即:

$$MTF(v_N) = \frac{\pi}{4} \frac{DN_{1,h} - DN_{1,l}}{DN_{1,h} + DN_{1,l}} \frac{DN_{0,h} + DN_{0,l}}{DN_{0,h} - DN_{0,l}} \quad (8)$$

式中: $DN_{1,h}$ 与 $DN_{1,l}$ 为红外三线靶标高、低辐射区在扣除暗电流后的响应值。

根据地面同步部署具有相同温阶的三线靶标与大面积靶标,基于靶区影像灰度特征联合解算,可得红外遥感卫星相机奈奎斯特频率处的调制传递函数值。

2 靶标及测试

红外三线靶标是由三条高发射率辐条与两条低发射率辐条相间排列组成,如图 1 所示。从图 1(a)可知,高低发射率辐条之间尺寸相同,辐条宽度等于地面像元分辨率,长度为宽度的 5 倍。辐条单元均由表层与红外辐射膜经导热胶黏贴在底部衬板上,如图 1(c)所示,以保证靶标平面度、表层材料发射率不同,进而通过辐条红外辐射膜的温度调控与监测,形成具有一定温差对比的三线靶标图案。

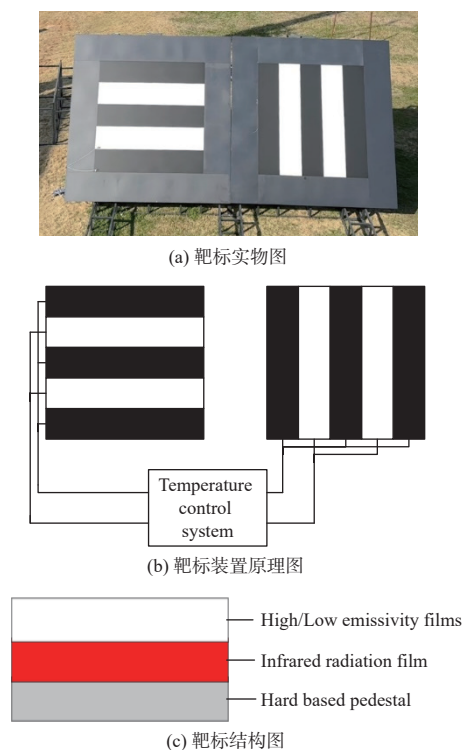


图 1 红外三线靶标

Fig. 1 Infrared three-bar target

靶标温度控制采用模糊 PID 算法,其核心为结合模糊逻辑与 PID 反馈,具有良好的温度控制速度与环境适应能力,能够快速实现红外三线靶标高精度温度调控与稳定,具体流程如图 2 所示。首先,温度传感器实时采集红外靶标温度 T ,将温差 ΔT (T 与设定温度的差值)、温差变化率 ΔT_c 作为参数输入到模糊控制器中,利用模糊规则库对 PID 参数进行修改,随后将修改后的 K_p , K_i , K_d 输入到 PID 控制器中,再将控制策略输送给温度控制器,温度控制器结合其温度 T 与来自 PID 控制器的控制策略,输出控制信号至红外靶标中的加热单元,实现 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 精度的温度跟踪。

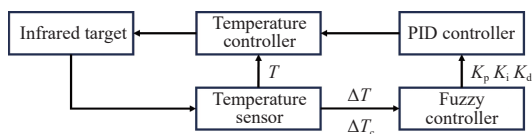


图 2 温度控制流程图

Fig. 2 Temperature control flow

温度均匀性、稳定性及重复性是作为红外遥感卫星相机 MTF 检测参照三线靶标的基本性能参数。分别在实验室与室外环境条件下,使用经定标的红外热像仪对其性能进行检测,检测结果如图 3 所示。使用靶标表面温度标准偏差来表征靶

标的温度均匀性;使用靶标在 30 min 内温度波动值表征靶标的温度稳定性;对红外靶标温度进行多次测量,使用相同时间内靶标平均温度的相对标准偏差来表征靶标的温度重复性。

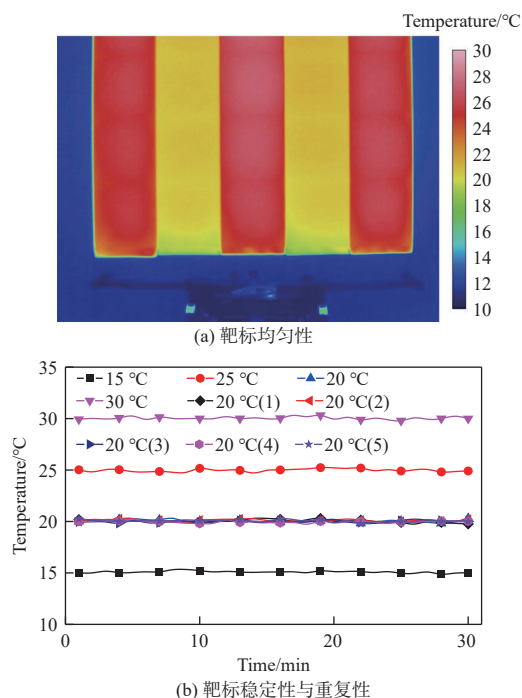


图 3 红外靶标实验室环境测试

Fig. 3 Infrared target laboratory environment test

在实验室温度 15°C 、相对湿度 50% 条件下,对红外靶标分别设置 15°C 、 20°C 、 25°C 、 30°C 进行测试,测试结果如表 1 所示。从表 1 可知,三线靶标温度均匀性优于 0.5°C , 30 min 内温度稳定性优于 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 。如图 3(b) 所示,对靶标 20°C 情景进行重复测试,经计算可得,靶标重复测试的温度相对标准偏差为 0.47%,即重复性优于 99%。在室外环境温度 15°C 、相对湿度 57%, 4 级风力条件下,对红外靶标进行室外环境测试,测试结果如图 4 所示。对红外靶标的高低发射率区域设置不同温度,使得红外三线靶标呈现出温度相间的温度梯度,如图 4(a) 所示。对室外靶标温度均匀性、稳定

表 1 靶标实验室温度均匀性、稳定性、重复性测试结果

Table 1 Laboratory test results of temperature uniformity, stability, repeatability of target

Set temperature/ $^\circ\text{C}$	Temperature/ $^\circ\text{C}$	Uniformity/ $^\circ\text{C}$	Stability/ $^\circ\text{C}$	Repeatability/%
15	15.09	0.39	± 0.22	—
20	20.06	0.41	± 0.24	99
25	24.97	0.42	± 0.25	—
30	30.04	0.47	± 0.26	—

性进行测试, 测试结果如表 2 所示。从表 2 可知, 红外靶标在设置 25 ℃、30 ℃ 温度梯度情况下, 表面温度均匀性均优于 0.5 ℃, 30 min 内温度稳定性优于±0.6℃。随后对此情况进行重复测试, 经计算可得, 靶标重复测试的温度相对标准偏差为 0.7%, 重复性优于 99%。

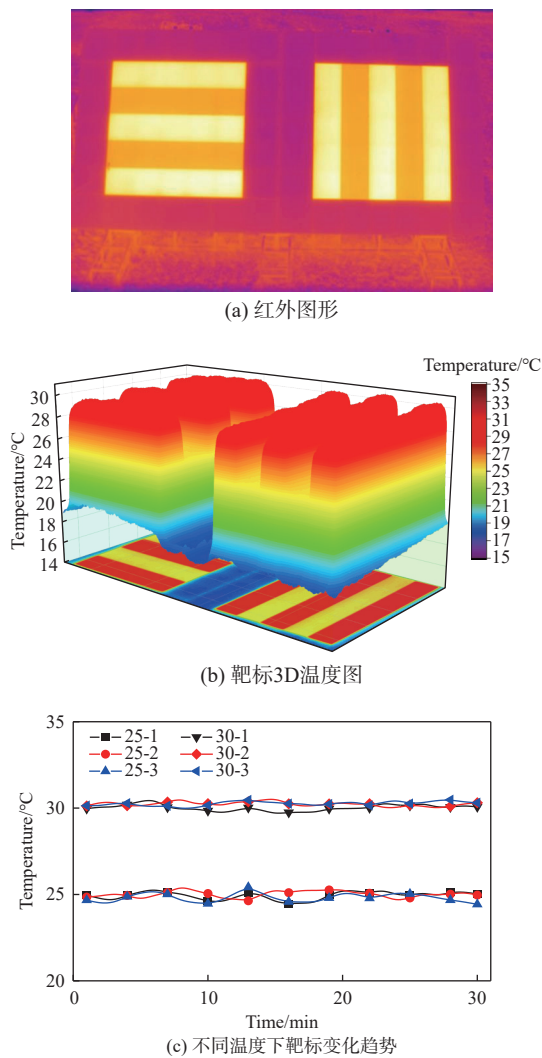


图 4 红外靶标室外环境测试情况

Fig. 4 Outdoor environment test of infrared target

表 2 靶标温度均匀性、稳定性室外测试结果

Table 2 Outdoor test results of temperature stability and uniformity of targets

Set	Temperature/ temperature/℃	Uniformity/ ℃	Stability/ ℃	Repeatability/ %
25-1	24.92	0.37	±0.46	99
25-2	25.01	0.37	±0.42	
25-3	25.01	0.38	±0.49	
30-1	30.01	0.45	±0.42	99
30-2	30.23	0.46	±0.54	
30-3	30.16	0.46	±0.52	

由表 1 和表 2 测试结果可知, 靶标表面均匀性 (标准偏差) 在实验室与室外条件下无明显差异, 但由于室外空气流动, 靶标表面与空气产生温度交换, 且室外环境为有风状态, 靶标的温度稳定性小于实验室, 但仍优于±0.6 ℃, 且重复性均优于 99%。

实验室与室外环境条件下测试结果表明, 三线靶标具有良好的温度特性。采用室外傅里叶变换红外光谱仪对三线靶标的热辐射特性进行测量, 获取了高低发射率辐条在红外谱段范围内的辐射亮度数据, 如图 5 所示。结合红外遥感卫星相机光谱响应函数, 可得三线靶标在 3 μm~5 μm 中红外波段地面调制度为 0.51, 8 μm~12 μm 热红外波段地面调制度为 0.32。

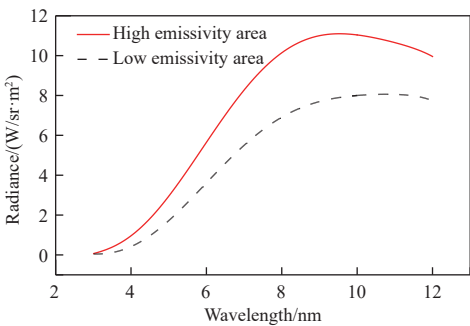


图 5 靶标高、低发射率区域光谱曲线

Fig. 5 Spectral curve of high/low emissivity region of target

主动加热式红外靶标可稳定生成高于 25 ℃ 的温差, 结合辐射传输模型计算结果表明, 靶标在卫星入瞳处可形成有效辐射对比度, 能够用于红外遥感卫星在轨 MTF 检测。根据红外三线靶标与大面积红外温阶靶标的影像数据, 通过提取靶标中心区域的高、低温响应值, 统计计算像方调制度和物方调制度, 便可得出红外遥感卫星相机奈奎斯特频率处的调制传递函数值。若将像方调制度与地面实测靶标辐射亮度计算的地面调制度结合, 则可反演出包含大气效应的系统调制传递函数值。

3 分析与讨论

基于三线靶标的红外遥感卫星相机在轨 MTF 检测方法, 能够定量分析红外遥感卫星相机的分辨率, 并通过与大面积温阶靶标结合, 读取三线靶标与温阶靶标影像响应值, 可计算出红外遥感卫星相机在奈奎斯特频率处的 MTF 值。在轨 MTF 的检测过程与实验室检测存在较大差异, 需充分

考虑广泛用于遥感领域的光电成像系统及数字图像的采样效应,同时对红外遥感卫星成像链路等相关因素进行分析。

依据方波靶标的傅里叶级数展开和光电成像系统的采样定理,通过红外遥感卫星相机对方波靶标进行观测与处理,可以得到奈奎斯特频率处的调制传递函数值。然而,由于制作无限周期方波靶标在实际中并不现实,经过仿真计算和在轨实验,三线靶标可有效替代无限周期方波靶标。为减小背景辐射及随机噪声的影响,高低温靶标辐条的长度尽量不小于宽度的 5 倍。三线靶标在轨检测时,根据红外遥感卫星相机的分辨率在沿遥感器飞行方向与垂直飞行方向上设置至少两组靶标,以提高检测精度。当三线靶标的组数设置较少时,应进行多次实验,以进行统计分析,从而提高 MTF 检测的精确度;反之,靶标组数设置较多,则能显著提高检测精度。基于三线靶标的红外遥感卫星相机在轨 MTF 检测时,还需依据遥感器的动态范围设置温差尽可能大的三线靶标,并将其布设在背景温度均匀且温度相对较低的位置,以提高在轨 MTF 检测精度。

红外遥感卫星相机的成像质量不仅受遥感器 MTF 的影响,还受大气及卫星平台运动等因素的干扰。本文提出一种基于三线靶标与温阶靶标协同的在轨 MTF 直接检测方法,利用具有相同发射率特性的大面积温阶靶标,同步解算入瞳端的物方调制度参数,结合三线靶标影像的像方调制度解析结果,在无需外场大气参数实测的情况下,实现了红外遥感卫星相机 MTF 的精确测量,有效消除了大气等因素对相机成像系统 MTF 检测的影响。此外,通过对地面测量的红外三线靶标高低温辐条出射辐射亮度进行分析,并结合大面积温阶靶标影像计算的物方调制度,可以计算出大气 MTF 值。根据红外遥感卫星相机系统的组成及相关仿真分析可知,温阶靶标的长宽尺寸应不小于 10 倍的地面分辨率,尽量消除环境背景辐射及邻近效应等影响,从而提高红外三线靶标在轨 MTF 检测精度。与传统倾斜刃边法相比,本文所提方法,在计算上避免了大气等因素对 MTF 检测的影响;在数据处理上减少了处理步骤过多而带来的误差,且人工靶标温差可控性较自然地物也有有效提升,提高了参数的稳定性。

在轨检测环境存在诸多不确定性,温度和风速

等因素可能随时发生变化,这可能会影响红外三线靶标的光学/温度辐射特性,进而降低高低温靶标辐条间的温度差异,影响在轨 MTF 检测的效果。因此,基于三线靶标的红外遥感卫星在轨 MTF 检测试验应尽可能在气温及风速相对稳定的晴朗天气进行,以减少环境对流或导热等因素引起的靶标调制度变化。外场环境变化(如风力)对红外三线靶标性能的影响,以及由此引发的对在轨 MTF 检测的影响等还在进一步分析中。

4 结论

基于三线靶标的红外遥感卫星 MTF 检测方法,以分辨率检测的三线靶标作为检测参照,在相同发射率的大面积红外温阶靶标配合下,不仅可以进行遥感卫星分辨率检测,还能够根据靶标遥感影像直接获取不含大气的红外遥感卫星相机奈奎斯特频率处 MTF 值,结合靶标地面辐射亮度测量与大面积温阶靶标影像可得场区大气 MTF 值。设计了红外遥感卫星相机在轨 MTF 检测的周期性方波靶标。试验测试结果与分析表明:红外三线靶标温度均匀性优于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,稳定性优于 $\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,重复性优于 99%;红外遥感卫星在轨 MTF 检测应用时,沿探测器方向与垂直飞行方向分别设置不少于五组高温阶三线靶标,能够实现红外遥感卫星相机高精度 MTF 检测。相对倾斜刃边法在轨 MTF 检测,三线靶标法可以直接检测红外遥感卫星相机系统 MTF 与分辨率,避免了多步骤数据处理与参数化模型拟合,具有较高的检测精度。

参考文献:

- [1] WANG W, ZHANG L H. On-orbit test of modulation transfer function for short-wave infrared camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(12): 358-362.
- [2] 马灵玲, 王宁, 高彩霞, 等. 光学遥感卫星在轨绝对辐射定标: 进展与趋势[J]. *遥感学报*, 2023, 27(5): 1061-1087.
MA Lingling, WANG Ning, GAO Caixia, et al. On-orbit absolute radiometric calibration for optical remote sensing satellites: progress and trends[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(5): 1061-1087.
- [3] SHEA J J. On-orbit MTF measurements[J]. *SPIE*, 1996, 2812: 221-230.
- [4] 卞江, 马冬梅, 孙鸽, 等. 红外光电成像系统 MTF 测试

- 技术分析[J]. 应用光学, 2013, 34(5): 748-753.
- BIAN Jiang, MA Dongmei, SUN Ge, et al. MTF test technology analysis of infrared electro-optical imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(5): 748-753.
- [5] 徐伟伟, 张黎明, 杨宝云, 等. 光学卫星相机在轨调制传递函数检测方法[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 194-200.
- XU Weiwei, ZHANG Liming, YANG Baoyun, et al. On-orbit modulation transfer function estimation of optical satellite camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 194-200.
- [6] 谭伟, 齐文雯, 王军, 等. 资源一号 02D 卫星可见近红外相机在轨调试与图像质量评价方法[J]. 航天器工程, 2020, 29(6): 60-66.
- TAN Wei, QI Wenwen, WANG Jun, et al. On-orbit adjusting and image quality assessment method for vnir camera of zy-1-02D satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(6): 60-66.
- [7] 夏天元, 帅宏进, 邱亚峰. 外场使用红外靶标系统的设计[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 1067-1073.
- XIA Tianyuan, SHUAI Hongjin, QIU Yafeng. Design of infrared target system for outfield[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(5): 1067-1073.
- [8] 王棧, 金宁, 刘国平, 等. 短波红外相机的最小可分辨对比度测试[J]. 红外技术, 2022, 44(8): 846-852.
- WANG Yan, JIN Ning, LIU Guoping, et al. Minimum resolvable contrast testing of short-wave ir camera[J]. Infrared Technology, 2022, 44(8): 846-852.
- [9] SLATER P N, BIGGAR S F, HOLM R G, et al. Reflectance-based and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 1987, 22(1): 11-37.
- [10] SILVA H S N, EICK F B L, DAMIAO A J, et al. Slanted edge method for MTF measurements in the infrared[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 118: 103877.
- [11] FOX M, SUNDBERG R, SHROLL R. Calibration of earth observing spectral imagers vicariously and with a controlled ground-based array[J]. SPIE, 2024, 13143: 131430U-1-10.
- [12] 孙德新, 柴孟阳, 刘银年, 等. 环境减灾二号 A/B 卫星红外相机在轨性能测试与稳定性评估[J]. 航天器工程, 2022, 31(3): 83-91.
- SUN Dexin, CHAI Mengyang, LIU Yinnian, et al. On-orbit performance tests and stability evaluation of infrared cameras on hj-2A/B satellites[J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(3): 83-91.
- [13] QI L T, LI L Y, NI X Y, et al. On-orbit spatial quality evaluation of sdgsat-1 thermal infrared spectrometer[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19(1): 1-5.
- [14] 郭强, 李欣耀, 陈桂林. FY-2 卫星热红外波段 MTF 在轨评价及其在改进图像质量中的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(5): 335-341.
- GUO Qiang, LI Xinyao, CHEN Guilin. On-orbit MTF evaluation for thermal infrared band of FY-2 satellite and its application in image quality improvements[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(5): 335-341.
- [15] 陈博洋. 基于月球观测的 FY-2G 中波红外波段在轨调制传递函数评价与图像复原[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 430-437.
- CHEN Boyang. Evaluation of MTF for FY-2G middle infrared band based on moon observation and image restoration[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 430-437.
- [16] TZANNES A P, MOONEY J M. Measurement of the modulation transfer-function of infrared cameras[J]. Optical Engineering, 1995, 34(6): 1808-1817.
- [17] WANG Z P, XIONG X X. Viirs on-orbit spatial characterization using the moon[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(6): 1116-1120.
- [18] 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): 99-104.
- 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): 99-104.
- [19] 成俊舟. 微结构 TDI-CCD 相机动态 MTF 模拟测试技术[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- CHENG Junzhou. Dynamic MTF simulation testing technology for microstructure TDI-CCD camera[D]. Beijing: University of Chinese Academy Science, 2022.
- [20] 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.