

# 基于三线靶标法的在轨 MTF 评价方法 及其精度分析研究

王琦<sup>1,④</sup>, 李显彬<sup>1</sup>, 李晓辉<sup>1</sup>, 唐伶俐<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电研究院, 北京 100190; <sup>④</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 首先介绍了三线靶标法在轨 MTF 评价的研究进展、分析了三线靶标法的优点和存在的问题; 其次在介绍三线靶标法原理的基础上, 提出了三线靶标的布设要求和靶标数据处理方法; 最后本文基于理论分析和仿真实验, 重点分析了相关因素(靶标尺寸, 传感器光谱响应函数, 相对采样相位, 靶标相对倾角, 靶标对比度与随机噪声等)对三线靶标法评价精度的影响, 为实施三线靶标法在轨 MTF 评价提供理论指导, 并为评价结果提供了量化的精度分析。

**关键词:** 三线靶标法; MTF; 精度分析; 仿真实验

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.01.003

**中图分类号:** TP79    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-3177(2011)113-0014-08

## A Research on MTF for On-orbit Estimation and Accuracy Analysis Based on Three-bar Method

WANG Qi<sup>1,④</sup>, LI Xian-bin<sup>1</sup>, LI Xiao-hui<sup>1</sup>, TANG Ling-li<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;

<sup>④</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; )

**Abstract:** Modulation Transfer Function (MTF) is one of the most comprehensive and standard measure to characterize the on-orbit performance of optical sensors. Estimation methods of on-orbit MTF can generally be divided into three-bar method, point source/array method, pulse method, knife-edge method and b $\pm$  resolution method according to the target. Among those methods, three-bar method is relatively straightforward, and it is widely used in laboratory measurement and on-orbit estimation. In this paper, quantifying the error contribution of each factor in on-orbit MTF estimation using three-bar method is focused, after the principle and relevant factors of on-orbit MTF estimation methods are systematically studied. It begins with a briefly introduction to MTF estimation, especially based on three-bar method. Secondly, the requirements of three-bar target deploying, the principle and basic processing steps of three-bar MTF estimation method are presented. Thirdly, the main factors and their impact on MTF estimation accuracy in three-bar method is stressed based on theoretical analysis and simulation experiment, including target size, reflectivity of target and the Spectral Response Function of system, relative sampling phase, the angle between orbit and three-bar, the contrast of three-bar target, the random noise during image acquisition, and so on. Finally, the guidelines for on-orbit MTF estimation using three-bar method are proposed.

**Key words:** three-bar method; Modulation Transfer Function (MTF); accuracy analysis; Simulation experiment

### 1 引言

调制传递函数 (Modulation Transfer Function,

MTF) 通过描述目标经过光学遥感载荷成像后各个空间频率上的调制度损失和信号扩散情况, 反映光学遥感载荷的整体成像性能, 是目前国际上普遍使用的

收稿日期: 2010-01-19    修订日期: 2010-02-25

基金项目: 国家 863 重点支持项目(编号: 2008AA121805)。

作者简介: 王琦(1984~), 男, 主要从事遥感数据质量分析方法和技术研究。

**E-mail:** bosshope@126.com

光学遥感载荷在轨运行性能的评价指标之一<sup>[1]</sup>。

根据靶标类型的不同,光学遥感载荷的在轨 MTF 评价方法通常可分为三线靶标法、点源/点阵法、刃边法、脉冲法和双分辨率法。各种评价方法都有其优点,并在光学遥感载荷在轨运行性能评价中得到广泛应用<sup>[2-3]</sup>。其中,三线靶标法基于 MTF 的定义,根据成像前后三线靶标的对比度变化计算载荷的 MTF,具有完备的数学公式推导和严密的理论基础;与其他方法相比,其数据处理方法和处理流程相对简单,在数据处理过程中不会引入新的误差。因此,三线靶标法在光学遥感载荷的实验室 MTF 评测和在轨 MTF 评价中发挥着重要的作用。

D. H. Kelly (1965) 通过理论分析建立了空间频率、传感器带宽和空间分辨率之间的关系,并提出了基于三线靶标法的 MTF 计算方法。Glenn D. Boreman 等(1995)研究了利用三线阵或四线阵靶标评价遥感载荷在轨 MTF 的方法。Rodney McKelip 等(1997)在 Stennis 空间中心(SSC)布设了三线靶标,靶标宽度以 21/6 个像元递增,并成功用于航空摄影的 MTF 评价。在 SPOT-5 的在轨测试阶段,通过获取亚利桑那州附近的三线靶标图像,来进行在轨 MTF 评价。John C. Feltz (1990)研究了离散系统(尤其是 CCD 采样器件)的 CTF (Contrast Transfer Function, 对比度传递函数)与 MTF 之间的关系<sup>[4-5]</sup>。

使用三线靶标法进行光学遥感载荷在轨 MTF 评价必须解决以下几个问题:(1)对于离散采样系统,采样系统和靶标之间存在着相对采样相位和相对倾角,会造成 MTF 计算精度的下降;(2)三线靶标法进行在轨 MTF 评价需要在地面布设较大的高质量三线阵靶标,这对某些中、低分辨率的光学遥感载荷往往无法实施。对于第二个问题,在高分辨率光学遥感载荷不断发展的今天,布设满足要求的三线靶标也越来越容易实现,因而能够为光学遥感载荷提供精度较高且稳定可靠的在轨 MTF 评价结果。

本文在介绍三线靶标法原理、靶标布设和数据处理方法的基础上,针对基于三线靶标法进行光学遥感载荷在轨 MTF 评价中存在的诸多问题,重点分析了靶标尺寸、传感器光谱响应函数、相对采样相位、靶标相对倾角、靶标对比度与随机噪声等关键因素对评价精度的影响,为实施三线靶标法在轨 MTF 评价提供理论指导,并可为评价结果提供量化的精度分析。

## 2 三线靶标法的原理和方法

### 2.1 三线靶标法的基本原理

当一个空间频率(单位为 lines/mm)为  $v$  的正弦波经过成像系统作用后,输出的正弦波的相位和幅度都会发生改变。通常,系统作用前后的正弦波的调制度定义为:

物方空间调制度:

$$M_{\text{物}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \quad (1)$$

像方空间调制度:

$$M_{\text{像}} = \frac{B_{\text{max}} - B_{\text{min}}}{B_{\text{max}} + B_{\text{min}}} \quad (2)$$

其中,  $I_{\text{max}}$  和  $I_{\text{min}}$  分别为输入信号的最大最小幅度值;  $B_{\text{max}}$  和  $B_{\text{min}}$  分别为输出信号的最大最小幅度值。

那么,该系统的调制传递函数(MTF)定义为:

$$MTF = \frac{M_{\text{像}}}{M_{\text{物}}} \quad (3)$$

实际上,在轨 MTF 评价中,由于难以在地面布设满足要求的正弦信号靶标,通常会布设一定宽度的矩形靶标,以计算载荷在该空间频率下的对比度传递函数(CTF),并进而获得载荷在该空间频率下的 MTF。Glenn D. Boreman 等(1995)给出了 CTF 和 MTF 之间的理论关系:

$$MTF(v) = \frac{\pi}{4} [CTF(v) + \frac{1}{3}CTF(3v) - \frac{1}{5}CTF(5v) + \frac{1}{7}CTF(7v) - \frac{1}{9}CTF(9v) \dots] \quad (4)$$

式(4)中,  $v$  为地面靶标的空间频率。由于在 Nyquist 频率下的 MTF 值是评价载荷性能的关键指标,通常只在地面布设像元宽度的三线矩形靶标,以评估载荷在 Nyquist 频率下的 MTF 值。由于大多数载荷的 MTF 随空间频率下降很快并逐渐趋近于 0,因此(4)式中的高频项可以忽略,由此可以简化为:

$$MTF_{@Nyquist} = \frac{\pi}{4} \cdot CTF_{@Nyquist} \quad (5)$$

综上所述,基于三线靶标法评价光学遥感载荷在轨 MTF 的基本方法是:在地面布设像元宽度的三线矩形靶标,通过计算载荷对三线靶标成像前后的对比度变化,评价载荷成像过程中的全链路 MTF。

### 2.2 三线靶标布设要求

根据上述基于三线靶标法评价光学遥感载荷在轨 MTF 的原理和方法,为了获得高精度的 MTF 评价结果,在布设三线靶标时应遵守:

<sup>1</sup> 三线靶标的反射率、倾角等特性应当不随时间而变化,以定期监测遥感载荷性能随时间的变化情况。

④为了同时评价飞行方向和垂直飞行方向的MTF,沿两个方向各布设5组三线靶标,靶标的方向要尽可能严格地与飞行方向和垂直飞行方向保持,相邻靶标之间相距2.2个像元,以尽量减少空间离散采样和相对倾斜角度对计算精度的影响。

(四)三线靶标的亮暗条纹的宽度为1个像元,亮暗条纹的长度大于5个像元并尽可能长,亮暗靶标之间的对比度在保证载荷不饱和的情况下应尽可能大,以有效抑制随机噪声的影响。

### 2.3 数据处理方法和流程

基于三线靶标法的光学遥感载荷在轨MTF评价的数据处理流程如图1所示。

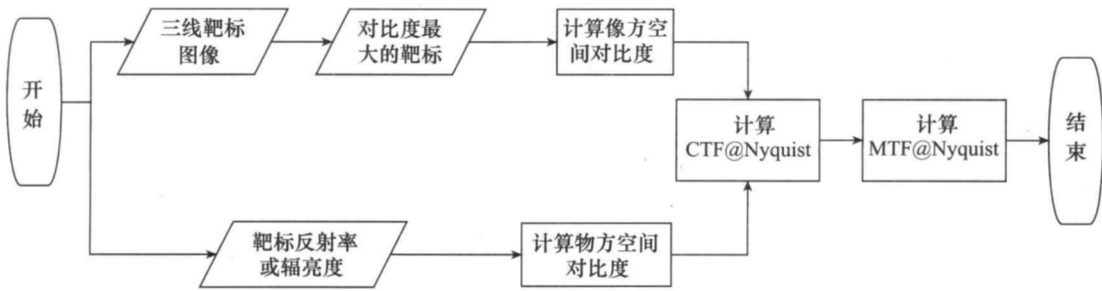


图1 三线靶标法数据处理流程

#### • 物方空间对比度调制度计算

物方空间的对比度根据式(1)进行计算。为了评价遥感载荷的在轨运行性能,靶标反射率或辐亮度应当采用入瞳反射率或辐亮度进行计算。

#### • 像方空间对比度调制度计算

像方空间的对比度根据式(2)进行计算。在获得对比度最大的一组靶标后,首先对靶标中心的有效亮暗靶标进行均值处理,抑制随机噪声对计算精度的影响。

#### • MTF@Nyquist 的计算

由于三线靶标法采用矩形靶标,因此,根据三线靶标法原理,在获得物方及像方空间对比度后,计算像方空间调制度与物方空间调制度的比值,得到载荷在Nyquist频率下的对比度传递函数(CTF),并进一步按照式(5)计算载荷的MTF@Nyquist。

### 3 三线靶标法精度分析

要分析三线靶标法计算光学遥感载荷在轨MTF的精度,必须根据三线靶标法的原理,系统地分析相关因素对计算精度的影响。实际上,由于无法获得光学遥感载荷在轨运行期间真实的MTF,因此对光学遥感载荷在轨MTF评价结果进行精度分析是传感器性能评估和遥感数据质量分析的一个重要内容,由于目前还没有得到应有的足够重视,因而一定程度上影响了评价结果的可信度和载荷数据的应用潜力。

#### 3.1 精度分析方法

由于光学遥感载荷在轨运行期间,无法获得其真

实的MTF。为了分析相关因素对三线靶标法评价精度的影响,通常采用仿真实验的方法进行精度分析。

首先为了验证精度分析方法的正确性,基于实测所得数据的经验值,我们使用仿真方法,暂不考虑各项误差影响因素,对成像过程进行了仿真,如图2所示。图2(a)为仿真的光学成像系统的响应函数,是一个二维高斯模型,该系统的MTF可以由高斯函数的标准差确定。由2维仿真成像系统响应函数获得某一方向上的一维响应函数,经过DFT及归一化处理,再考虑CCD采样效应,得到该方向上的MTF曲线,如图2(b)所示,对应的MTF@Nyquist为0.1431。根据3.2.1节的分析,设置靶标的大小为11×7个像元,亮暗靶标的灰度值为250和20,背景像元的灰度值为60,仿真得到如图2(c)所示的亚像元靶标图像,图像不包含任何噪声。将图2(a)所示的PSF(Point Spread Function,点扩散函数)作用于图2(c)所示的靶标图像,并按照1 pixel进行重采样后得到如图2(d)所示的退化靶标图像<sup>[6]</sup>。图2(e)给出了退化靶标图像的灰度值,通过计算得到的MTF@Nyquist为0.1443,相对误差为0.84%。上述仿真试验结果充分说明了仿真试验方法和思路的正确性,可以应用到下面的相关精度影响因素的分析中。

#### 3.2 相关因素影响分析

##### 3.2.1 靶标尺寸影响分析

通常情况下,三线靶标的大小为5×5个像元。对于成像性能较好(MTF较大)的载荷,其PSF不超过3倍GSI(Ground Sample Interval,地面采样间

隔), 5 × 5 个像元大小的靶标可以满足评价在轨 MTF 的要求。但是对于具有较低在轨 MTF 的遥

感载荷, 可能需要更大尺寸的三线靶标才能消除地面背景对测试精度的影响, 获得较为理想的结果。

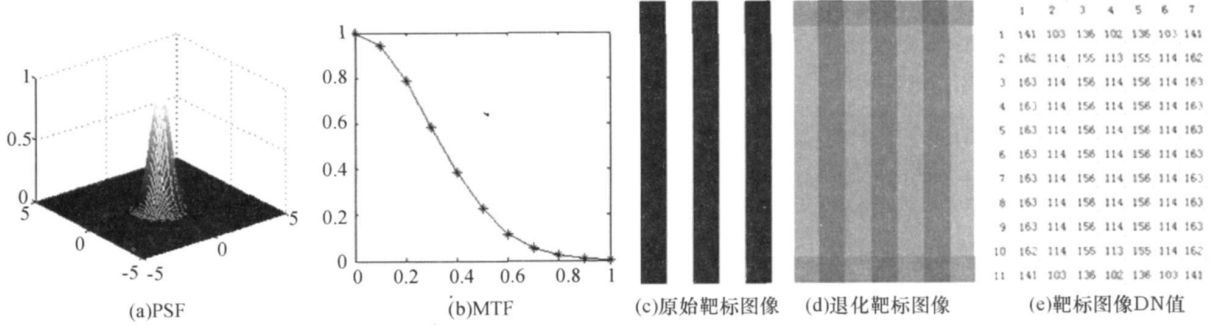
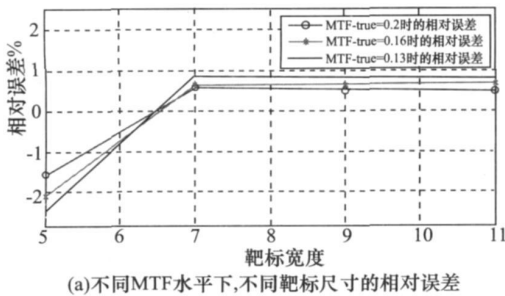


图2 仿真试验方法验证结果

通过仿真实验, 分析在不同 MTF 水平下需要的靶标大小, 该项分析暂不考虑随机噪声的影响。首先仿真不同靶条数目的理想靶标, 并生成不同 MTF 水平的仿真系统的 PSF, 进行上述处理后分析不同 MTF 水平下、靶条数目对于 MTF 评价精度的影响。假设亮暗靶标的灰度值分别为 250、20, 靶标背景的灰度值为 60, 靶条数为 5、7、9、11pixel。图 3 给出了 MTF 计算精度随靶标宽度(靶条数目)的变

化情况, 对应的三组 MTF@ Nyquist 仿真值分别为 0. 2、0. 16、0. 13。可见, 对于大多数光学遥感载荷而言, 布设 7 个像元宽度的靶标可以将误差控制在 1% 以下, 因此应尽可能布设 7 个像元宽度的靶标。此外, 为了避免随机噪声、相对采样相位、靶标相对倾角等因素的影响, 靶标的长度应不小于 7 个像元, 在条件允许的情况下, 靶标应尽可能长, 以有效地抑制随机噪声对计算结果的影响。



MTF_true@ Nyquist	靶标宽度	绝对误差	相对误差
0.2	5pixel	-0.00310	-1.54%
	7pixel	0.00120	0.60%
	9pixel	0.00100	0.50%
	11pixel	0.00100	0.50%
0.16	5pixel	-0.00340	-2.10%
	7pixel	0.00110	0.67%
	9pixel	0.00104	0.65%
	11pixel	0.00104	0.65%
0.13	5pixel	-0.00330	-2.50%
	7pixel	0.01118	0.86%
	9pixel	0.00105	0.81%
	11pixel	0.00105	0.81%

(b)具体计算结果

图3 靶标尺寸分析结果

### 3.2.2 载荷 SRF 影响分析

基于三线靶标法评价光学遥感载荷在轨 MTF 时, 计算物方空间调制度所采用的靶标反射率(或辐亮度)应该是亮暗靶标的入瞳反射率(或辐亮度)。利用入瞳反射率(或辐亮度)计算的物方空间调制度能够消除大气模糊和传感器光谱响应函数(Spectral Response Function, SRF)的影响。载荷光谱响应函数定义为:

$$SRF(\lambda) = P(\lambda)/L(\lambda) \quad (6)$$

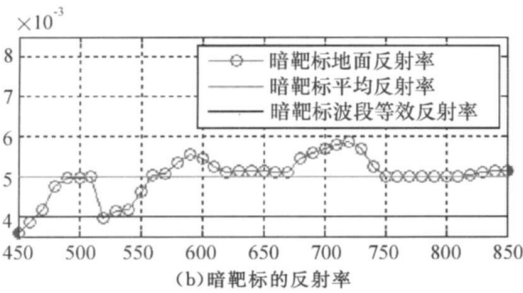
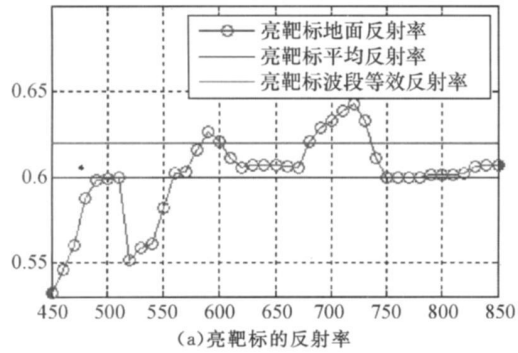
式中, SRF(λ)为光谱响应函数; L(λ)为载荷接收到的单色辐射亮度; P(λ)为载荷在对应单色辐射下的反应量。波段内等效反射率可以通过下式计算:

$$\rho_e = \frac{\int_{\lambda_L}^{\lambda_U} \rho_s SRF(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_L}^{\lambda_U} SRF(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

其中, ρ<sub>s</sub> 为遥感载荷波段内等效反射率, ρ<sub>λ</sub> 为光谱反射率, SRF(λ) 为波段响应函数, 积分下标 λ<sub>L</sub>、λ<sub>U</sub> 分别为波段光谱范围内最小、最大波长值。

对于在轨运行光学遥感载荷, 如果无法获得载荷的 SRF, 可以采用靶标的波段内平均反射率来代替波段内等效反射率, 这样会引入相应的计算误差。图 4 给出了某载荷的地面测量的亮暗靶标反射率, 通过计算得到了亮暗靶标的波段内平均反射率、波段内等效反射率(假设载荷的 SRF 为高斯函数)。若载荷的波段范围为 480nm~ 850nm, 亮靶标的波段内平均反射率和等效反射率分别为 0. 6、0. 62; 暗靶标的波段内平均反射率和等效反射率分别为 0. 05、0. 04。使用波段内平均反射率和等效反射率分别计算的物方空间调制度为 0. 846、0. 879, 假设

载荷的 MTF@ Nyquist 真值为 0.1431, 像方空间调制度为 0.160, 而通过波段内平均反射率计算的 MTF@ Nyquist 为 0.1486。因此, 使用波段内平均反射率代替波段内等效反射率而引起的绝对 MTF 计算误差为 0.0055, 相对误差为 3.84%。



	波段内平均 反射率	波段内等 效反射率
物方空间 调制度	0.8460	0.8790
像方空间 调制度	0.1600	0.1600
MTF@Nvquist	0.1486	0.1431
绝对误差	0.0055	0.0000
相对误差	3.84%	0.0000

(c)使用波段内平均反射率带来的计算误差

图4 载荷 SRF 影响分析结果

### 3.2.3 相对采样相位影响分析

基于三线靶标法评价光学遥感载荷 MTF 时, 要求将传感器的采样网格完全与靶标条纹对齐, 即要求二者之间的相位差为 0。在实验室中可以通过调整二者的相对位置满足该项要求, 然而当载荷在轨运行时则无法实现这一点。因此在布设靶标时, 每个方向都布设了 5 组靶标, 相邻靶标之间相距 2.2 个像素, 靶标之间的相位差为 0.2pixel, 从而使得影响在轨 MTF 评价精度的相对采样相位在 - 0.1pixel~ + 0.1pixel 之间变化。

通过仿真实验, 分析在不同 MTF 水平下, 三线

靶标法计算精度随着相对采样相位的变化情况。在不考虑随机噪声和靶标相对倾角影响的情况下, 设亮暗靶标的灰度值分别为 250、20, 靶标背景的灰度值为 60, 靶标大小为 11×7 个像素。图 5 给出了 MTF 计算精度随相对采样相位的变化情况, 对应的三组 MTF@ Nyquist 仿真值分别为 0.2、0.16、0.13。可见, 随着相对采样相位的增加, MTF 计算值与仿真值之间的绝对误差和相对误差逐渐增加; 当相对采样相位达到 0.1pixel 时误差最大, 但不超过 4%。

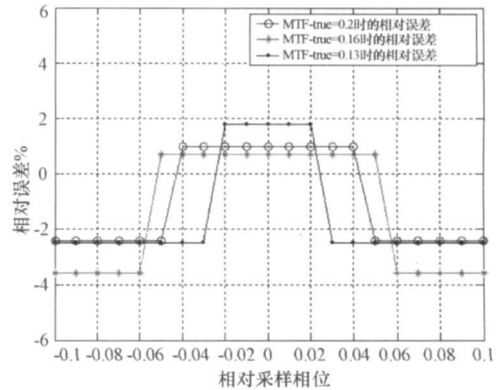
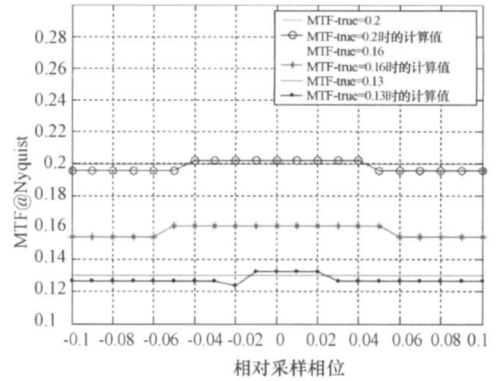


图5 不同 MTF 水平下, 计算结果和误差随相对采样相位变化的结果

### 3.2.4 靶标相对倾角影响分析

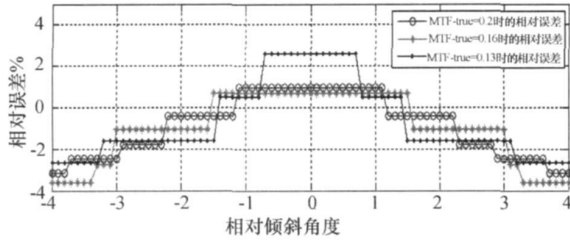
基于三线靶标法进行光学遥感载荷在轨 MTF 评价时, 要求地面布设的三线靶标严格平行或者垂直于载荷采样方向。但由于轨道飘移、载荷姿态晃动、地面方位测量等因素, 会导致靶标与载荷采样方向存在一定的相对倾角。

首先我们的仿真试验分析 MTF 计算精度仅随相对倾角的变化情况。由于卫星和载荷的姿态稳定性相对较高, 并且在布设三线靶标时, 充分考虑地磁偏角等因素的影响, 靶标与载荷采样方向的相对倾角能够控制在 ±1° 之间。设亮暗靶标的灰度值分别为 250、20, 靶标背景的灰度值为 60, 靶标大小为 11×7 个像素。图 6(a) 给出了相对倾角从 - 4° ~ + 4°。逐

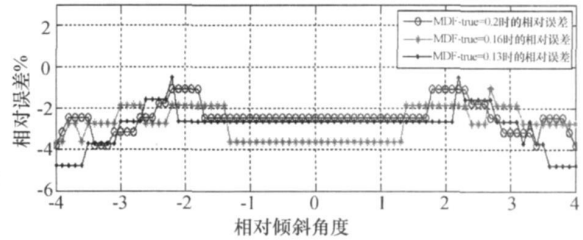
渐改变, MTF 计算精度随之变化的情况, 对应的三组 MTF@Nyquist 仿真值分别为 0.2、0.16、0.13。可见, MTF 计算精度随着相对倾角的增加而下降; 当相对倾角在  $\pm 1^\circ$  之间时, 相对误差最大不超过 3%。

其次, 仿真实验分析综合考虑相对采样相位和相对倾斜角度影响时, MTF 计算精度的变化情况。

设亮暗靶标的灰度值分别为 250、20, 靶标背景的灰度值为 60, 靶标大小为  $11 \times 7$  个像素。图 6(b) 给出了相对采样相位为 0.1pixel, 相对倾角从  $-4^\circ \sim +4^\circ$ 。逐渐改变, MTF 计算精度随之变化的情况, 对应的三组 MTF@Nyquist 仿真值分别为 0.2、0.16、0.13。可见, 当相对采样相位为 0.1pixel, 相对倾角在  $\pm 1^\circ$  之间时, 相对误差最大不超过 3.8%。



(a) 相对相位=0, 不同 MTF 水平下, 要对误差随相对倾斜角度的变化

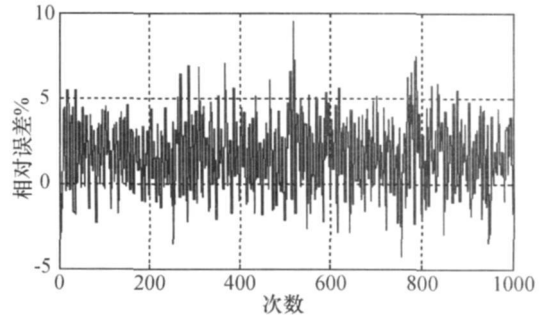


(b) 相对相位=0.1pixel, 不同 MTF 水平下, 要对误差随相对倾斜角度的变化

图 6 相对倾斜角度影响分析的结果

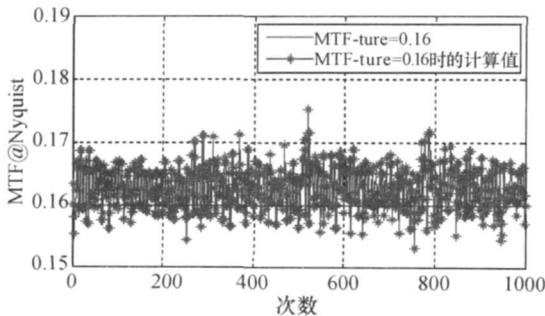
### 3.2.5 靶标对比度及随机噪声影响分析

理论和实验分析表明: 在不考虑随机噪声影响的情况下, MTF 计算精度不受靶标对比度的影响。综合考虑三线靶标法 MTF 评价精度随噪声与对比度的变化情况, 进行了 1000 次仿真试验, 假设亮靶标灰度值随机选择 240、220、200、180 中的一个数值, 而暗靶标灰度值随机选择 20、25、30、35 中的一个数值, 背景灰度值为 60, 靶标大小为  $11 \times 7$  个像素。不考虑相对采样相位和靶标相对倾角的影响, 随机噪声的标准差随机选择 0.2、0.5、0.7、1 中的一个数值。图 7 给出了 1000 次试验的结果。图 7(a) 为 1000 次试验的 MTF@Nyquist 仿真值为 0.16 时的计算结果, 图 7(b) 是相应的 1000 次试验的相对误差。可见, 在上述仿真条件下, 最大相对误差为 9.51%, 平均相对误差为 1.66%, 相对误差的标准差为 2.19%, 99.2%(992 次) 试验的精度优于 7%。其他的仿真实验结果还表明, 随着对比度的增加, MTF 计算精度总体呈上升趋势; 随噪声水平的增加, MTF 计算结果的稳定性下降。



(b) 噪声和对比度影响下的结果的相对误差

图 7 对比度及随机噪声影响分析的结果



(a) MTF=0.16, 噪声和对比度影响下的计算结果

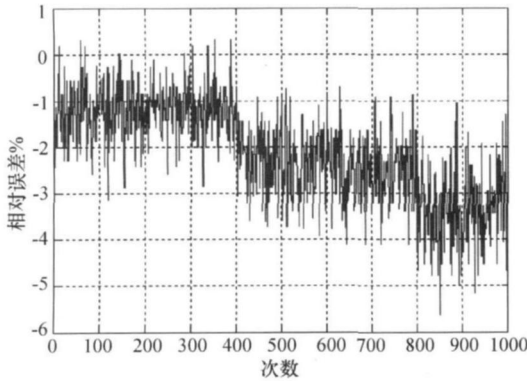
### 3.3 三线靶标法总体精度分析

以上仿真实验分析了各个因素单独作用对三线靶标法进行光学遥感载荷在轨 MTF 评价造成的影响, 但是实际应用中上述这些因素是相互作用的, 需要考虑各项因素的综合影响, 才能为在轨测试人员提供在一定测试条件下的置信度。

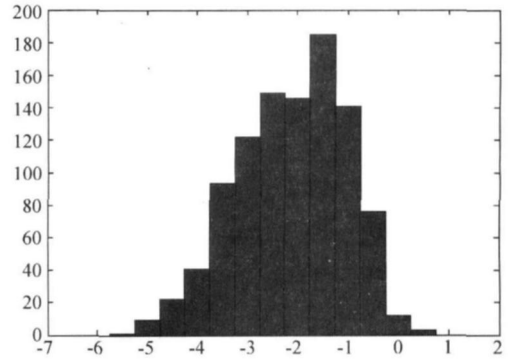
我们将测试人员可控的因素作为不变参量(如靶标尺寸), 将不可控的因素作为变量(如靶标对比度、相对采样相位、靶标相对倾角等), 通过仿真试验确定计算结果精度的变化情况。设靶标大小为  $11 \times 7$  个像素, 亮靶标灰度值随机选择 240、220、200、180 中的一个数值, 而暗靶标灰度值随机选择 20、25、30、35 中的一个数值, 背景灰度值为 60, MTF@Nyquist 为 0.2、0.16、0.13 中的一个随机数值, 采样相对相位为 0、0.02、0.04、0.06、0.08、0.1 中的一个随机数值, 靶标相对倾角为  $0^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $1^\circ$  中的一个随机数值, 随机噪声的标准差是 0.2。1000 次随机试验的结果如图 8 所示, 图 8(a) 是 1000 次试验的

相对误差分布,而图 8(b) 给出了 1000 次试验的相对误差的直方图统计。可见,相对误差绝对值最大为 5.63%,平均相对误差为- 2.108%,相对误差的标准差为 1.077%,99.8%(998 次) 试验的精度优于 5%,全部试验的精度优于 6%。图 9、10 给出了另外两组 1000 次试验的结果,仿真参数除了随机噪声的标准差分别为 0.5、0.7 外,其他与第一组采用相同的实验条件。对于随机噪声标准差为 0.5 的情况,相对误差绝对值最大为 6.73%,平均相对误差为- 2.087%,相对误差的标准差为 1.256%,98.4%

(984 次) 试验的精度优于 5%,全部试验的精度优于 7%。对于随机噪声标准差为 0.7 的情况,相对误差绝对值最大 7.6%,平均相对误差为- 2.1134%,相对误差的标准差为 1.3742%,97.9%(979 次) 试验的精度优于 5%,99.9%(999 次) 试验的精度优于 7%。对比三组试验可以得出:随机噪声水平是影响计算精度和稳定度的重要因素,在实施在轨 MTF 评价时,要尽可能保证靶标的均一性,增加靶标的对比度和长度,以有效地抑制随机噪声的影响。

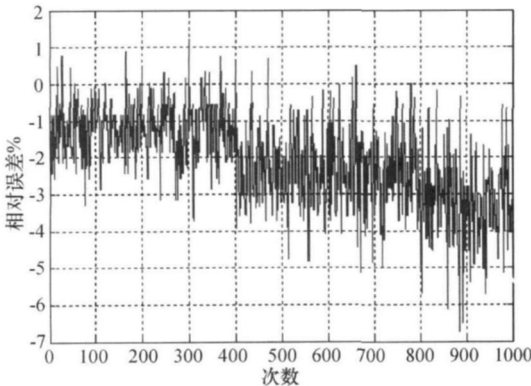


(a) 相对误差结果

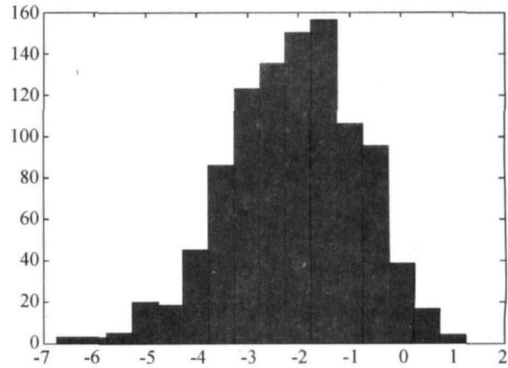


(b) 相对误差的直方图分布

图 8 随机噪声标准差=0.2 时的综合分析结果

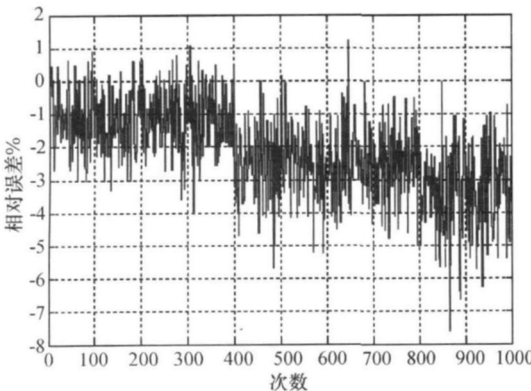


(a) 相对误差结果

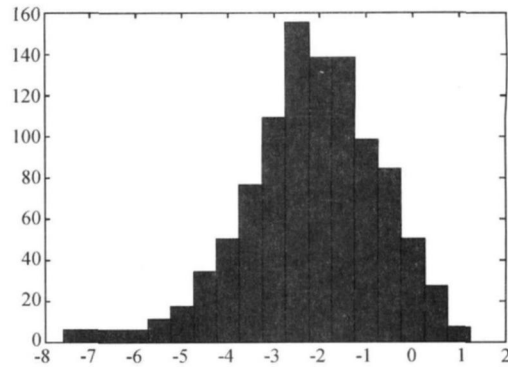


(b) 相对误差的直方图分布

图 9 随机噪声标准差=0.5 时的综合分析结果



(a) 相对误差结果



(b) 相对误差的直方图分布

图 10 随机噪声标准差=0.7 时的综合分析结果

## 4 结束语

调制传递函数(MTF)是评价光学遥感载荷在轨性能和成像质量的重要指标,三线靶标法在实验室MTF测试和在轨MTF评价中都发挥着重要的作用。本文采用仿真方法分析了靶标尺寸、传感器光谱响应函数、相对采样相位、靶标相对倾角、靶标对比度与随机噪声等因素对于MTF评价精度的影响,并对一定条件下的总体评价精度进行分析。分析结果表明:

(1)通常情况下,采用宽度为7个像元的靶标能够基本满足MTF计算精度要求。

(2)相对采样相位和相对采样倾角会影响三线靶标法MTF计算精度,当靶标相对倾角小于 $1^\circ$ ,相对采样相位为 $-0.1\text{pixel} \sim 0.1\text{pixel}$ 时,能够基本满

足MTF计算精度要求。

(3)SRF会对MTF计算精度带来影响,但并不显著,可以通过地面测量的反射率数据和实验室测量的SRF进行计算,提高MTF计算的精度。

(4)随机噪声是影响三线靶标法精度和计算结果稳定性的重要因素,可以通过增加靶标的长度(如 $20\text{pixel}$ )、提高传感器量化级数、提高亮暗靶标的对比度等方法,抑制随机噪声的影响。MTF水平高于0.13,并且考虑上述各项因素的综合影响,当随机噪声标准差小于0.7时,MTF评估结果的精度能够优于7%。

另外,大气可能是影响三线靶标法MTF计算的另一个关键因素,需要选择大气状况较好的数据进行MTF计算,并根据需要测量相关大气参数,对大气的MTF进行建模,从而剥离大气的影响。

## 参考文献

- [1] Dennis L. Helder, Taeyoung Choi. KONOS satellite on orbit modulation transfer function (MTF) measurement using edge and pulse Method[D]. Electrical Engineering Department of South Dakota State University, 2002.
- [2] Viallefont-Robinet, Françoise and Cansot Elodie. SPOT 5 MTF Measurement using biresolution images[C]// Proceedings of the SPIE. 2004(5570): 245- 255.
- [3] Leger D., Viallefont F., Hillairet E., Meygret A.. In-flight refocusing and MTF assessment of SPOT5 HRG and HRG [C]// SPIE. 2003(4881): 224- 231, 2003.
- [4] D. Kelly. Spatial frequency, Bandwidth and Resolution[J]. Appl. Opt., 1965(4): 435- 435.
- [5] G. Boreman, S. Yang. Modulation transfer function measurement using three- and four- bar targets[J]. Appl. Opt., 1995(34): 8050- 8052.
- [6] Kohm, K. Modulation transfer function measurement method and results for the OrbView-3 high resolution imaging satellite[C]// Proceedings of ISPRS. 2004.
- [7] 贾永红. 数字成像系统调制传递函数的测定及应用[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1991, 116(4): 23- 30.
- [8] 杨桦, 朱永红, 焦文春, 等. CCD的输出响应与相机MTF测试[J]. 光学技术, 2001, 27(5): 444- 446.
- [9] 王鸿南, 钟文, 汪静, 等. 图像清晰度评价方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(7): 828- 831.

## 2010年度获表彰的国产空间信息系统软件开发单位和名称

1. GIS平台软件: (1)北京超图软件股份有限公司“超图地理信息系统软件平台套件V6R”; (2)武汉中地数码科技有限公司“MAPGIS K9地理信息系统”

2. RS平台软件: 武汉中地数码科技有限公司“中地遥感平台2010”

3. GIS专业应用软件: (1)中国测绘科学研究院“地学之窗政务地理信息应用基础平台V7.0”; (2)北京山海经纬信息技术有限公司“警用综合地理信息系统V6.0”; (3)北京超图软件股份有限公司“超图服务式网络地理信息系统开发平台V6.0” (4)北京苍穹数码测绘有限公司“苍穹土地利用规划管理信息系统软件V1.0”; (5)北京苍穹数码测绘有限公司“苍穹土地利用规划建库工具软件V1.0”; (6)武大吉奥信息技术有限公司“吉奥地理信息服务平台软件4.5”; (7)北京龙软科技发展有限公司“煤矿安全生产综合管理信息系统V3.0”; (8)北京中遥地网信息技术有限公司“网络地理信息系统软件V8.1”; (9)北京数字政通科技股份有限公司“政通”嵌入式地图引擎系统V1.0。

4. RS专业应用软件: (1)天津中科遥感信息技术有限公司“GT Server 卫星遥感应用服务平台”; (2)武汉大学“低空数码影像全自动匹配软件V1.0”; (3)中国科学院遥感应用研究所“省级农情遥感监测系统V2.1”。

5. GNSS专业应用软件: (1)武汉苍穹数码仪器有限公司“Caravel PP/PPP GNSS高精度定位测速软件V3.3”; (2)大连润霖秋实科技有限公司“润霖车载信息服务支撑平台(MyStar平台)”; (3)上海华测导航技术有限公司“GNSS动态后差分数据处理软件V2.0”; (4)广州市中海达测绘仪器有限公司“ZNetVRS连续运行虚拟参考站系统V1.0”; (5)广州南方测绘仪器有限公司“南方网络参考站系统V2.0”; (6)四川长虹佳华信息产品有限责任公司“长虹车载TSP终端信息系统”。