

引用格式: Li Chuanrong, Xu Hang, Li Xiaohui, *et al.* An Optimized MTF Assessment Algorithm based on Airborne Linear Array Optical Payload[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(6): 1006-1012. [李传荣, 徐航, 李晓辉, 等. 基于机载线阵光学载荷 MTF 评估算法的优化[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 1006-1012.]

基于机载线阵光学载荷 MTF 评估算法的优化

李传荣¹, 徐 航^{1,2}, 李晓辉¹, 张 静^{1,2}

(1. 中国科学院光电研究院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 调制传递函数是目前国际上普遍使用的光学遥感载荷在轨运行性能的重要评价指标, 而刃边法是评估中高分辨率光学载荷在轨 MTF 最普遍使用的方法。针对推扫型机载线阵光学遥感载荷成像特点, 重点考虑姿态因素对算法评估精度的影响, 对刃边算法进行调整和优化以适应推扫型机载线阵光学遥感载荷的 MTF 评估; 还改进了精度分析方法, 引入了载荷姿态影响因素, 并利用真实载荷姿态数据生成仿真刃边图像对算法的有效性和评估精度进行了验证。

关 键 词: 刃边法; MTF; 机载线阵 CCD; 精度分析

中图分类号: TP 751.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)06-1006-07

1 引 言

调制传输函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 描述了目标经过光学遥感载荷成像后在各个空间频率上的调制度损失和信号扩散情况, 是定量表征光学遥感载荷成像性能的重要指标, 也是国际上目前普遍使用的评价光学遥感载荷性能的重要指标。但是目前针对运行中的机载线阵光学载荷 MTF 评估算法的研究并不多见, 这主要是由于航空遥感影像多用于测绘, 对于机载光学载荷的几何检校以及几何性能如几何定位精度、几何畸变等指标的评估更为关注^[1]; 另一方面机载光学载荷多为面阵载荷, 评估星载光学载荷 MTF 的各类算法也适用于机载面阵光学载荷。随着我国高分辨率遥感技术的飞速发展, 各种新型高分辨率线阵光学载荷 (如三线阵载荷、航空高光谱载荷等) 开始逐步用于航空遥感, 并且星载光学载荷也开始引入以定标和性能检测为目的的发射前航空校飞的技术环节^[2], 在上述背景下, 包括 MTF、信噪比、辐射分辨率等指标在内的机载线阵光学载荷成像性能飞行评估方法研究

开始日渐受到关注^[1]。

光学遥感载荷 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、双分辨率法等。在这些评估方法中, 刃边法因其能够很好地描述成像系统的空间响应特性, 并且在实际应用中靶标的布设与选取条件也相对宽松, 因而是评估中高分辨率星载光学载荷在轨 MTF 最普遍使用的方法^[3], 例如 SPOT、IKNOS、QuickBird、GeoEye、CBERS02B-HR 等均采用刃边法进行在轨 MTF 的评估^[4-7], 基于刃边法评估在轨 MTF 的技术也趋于成熟。从理论上说, 基于刃边法的 MTF 在轨评估算法适用于对各种类型光学遥感载荷 (星载、机载) 进行 MTF 评估。但是, 使用刃边法利用刃边靶标影像评估载荷的 MTF 时, 通常基于 2 个假设: ①载荷所获取影像的刃边为直线, 这样在算法的边缘探测环节, 可以对边缘点进行直线拟合以抑制噪声影响, 从而保证边缘点位置的准确提取; ②靶标刃边与载荷推扫方向成一定角度, 各行边缘点的位置排列具有规律性, 即刃边图像各行边缘点的相位按照单调递增或单调递减的规律变化, 这样在提取边扩散函数 ESF

收稿日期: 2012-07-21; 修订日期: 2013-10-22

基金项目: 国家 863 计划项目“数据处理与科学分析系统技术研究”(2008AA121805)、“对地观测载荷性能与数据质量检测关键技术”(2012AA12A302)。

作者简介: 李传荣 (1956—), 男, 湖南醴县人, 研究员, 主要从事遥感卫星地面应用系统研究。E-mail: crli@aoe.ac.cn。

通讯作者: 李晓辉 (1971—), 女, 辽宁海城人, 研究员, 主要从事遥感图像处理方面研究。E-mail: xhli@aoe.ac.cn。

(Edge Spread Function)时,可以利用这一特点获取更多采样点数以解决数据欠采样的问题,提高 MTF 计算精度^[3-4]。对于推扫型机载线阵光学遥感载荷,由于飞机飞行姿态变化相对卫星平台更大,所获取的刃边靶标图像通常会存在一定程度的扭曲与变形,各行刃边边缘点相位变化的规律性也被破坏,如果仍旧采用原有刃边算法计算 MTF,将可能无法保证 MTF 的评估精度。因此,利用推扫型机载线阵光学遥感载荷所获取的刃边图像计算 MTF 时,有必要对 MTF 刃边算法进行相应调整。

本文结合推扫型机载线阵光学载荷成像特点对刃边 MTF 算法进行调整和优化,以适用于机载线阵遥感载荷影像的 MTF 评估,在设计精度分析方法时引入姿态影响因素,然后利用真实的载荷飞行姿态数据生成仿真图像,对算法的有效性和评估精度进行了分析和验证。

2 刃边法 MTF 评价原理

刃边法评估 MTF 的原理是利用具有一定对比度反差的两块相邻的均匀亮/暗地物(通常是刃边靶标)的边界,通过测定载荷对该边界的扩展情况(刃边缘的模糊)来确定载荷成像系统在各个空间频率的响应,从而得到该载荷的 MTF 曲线。该方法的理论基础是:光学载荷对刃边靶标成像获得刃边图像,刃边图像区域中垂直于刃边边界的每一行数据都是光学载荷对于阶跃函数的响应(边扩散函数 ESF),根据线性移不变系统与卷积的性质,对 ESF 进行微分(或差分)即可得到系统在垂直刃边方向的一维点扩散函数,即线扩散函数 LSF(Line Spread Function),对 LSF 进行傅立叶变换即可得到该方向的 MTF^[3-5]。采用刃边法评估光学载荷 MTF 的算法流程如图 1 所示。

为了解决数字光学成像系统欠采样问题,刃边靶标布设时通常会使用刃边与成像系统扫描方向形成一个微小夹角,保证从一个扫描行到另一个扫描行的刃边位置有一个微小的位移,将各个扫描行以刃边边界为基准进行配准即可增加 ESF 的采样点,从而提高算法的精度。另外,刃边靶标的两个高对比度区域应尽可能保证反射率均匀,以保证输入系统的阶跃函数的一致性;刃边应尽可能保持笔直,一方面可以利用边缘点位于同一直线上这一先验知识更为准确地提取边缘点位置,另一方面利用各行数据点位移是线性单调递增(递减)的特点来保证数据配准和 ESF 提取的正确性^[3-4]。

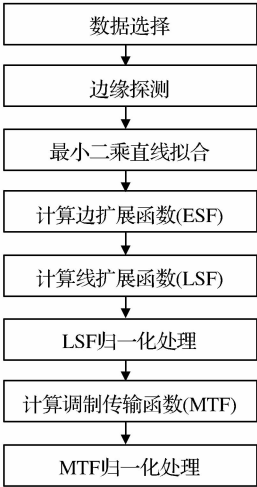


图 1 MTF 刃边法评估算法流程
Fig. 1 Flowchart of the knife-edge method

3 机载线阵推扫型光学载荷成像特点

推扫型线阵光学载荷成像时以时序方式沿飞行方向逐行推进扫描,获取的多行数据组成一幅完整的影像,成像方式如图 2 所示。机载线阵推扫型光学载荷与星载线阵推扫型光学载荷的成像差异主要来自于传感器的搭载平台。由于卫星处于大气层外部,运行状态中不受大气层的风、雨等天气状况和大气层内气流作用的影响,能够保持相对稳定的运行姿态;而搭载机载线阵载荷的飞机在大气层内飞行,由于低空气流变化以及飞机平台重量较轻等原因,造成载荷的姿态变化较大^[2]。

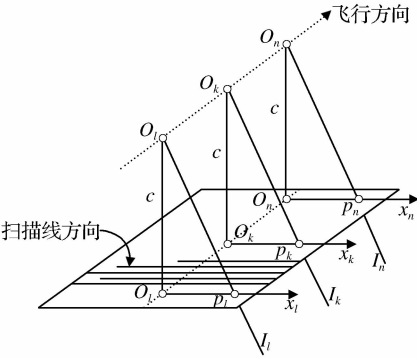


图 2 推扫式线阵传感器的成像原理
Fig. 2 Imaging scheme of push-broom linear array sensor

由于飞机飞行时载荷姿态变化较大,原来笔直的地物目标在载荷获取的图像上会呈现出明显的扭曲。同理,地面布设的笔直的刃边靶标被搭载于飞机平台上的推扫型线阵光学载荷成像后,图像上的刃边区域会呈现锯齿、扭曲等不规则形状,如图 3 所示。如果仍用原来的方法对这样的刃边图像评估

MTF,可能会造成较大的评估误差,因此需要对刃边法 MTF 评估算法加以调整和改进。

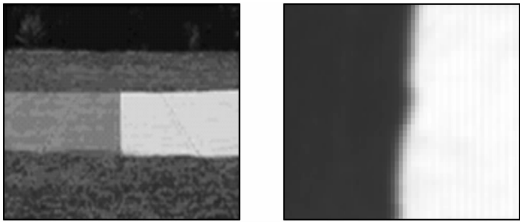


图 3 刃边靶标的直线刃边成像后呈现扭曲和锯齿状
Fig. 3 Straight knife-edge targets become distorted and jagged after imaging

4 刃边算法调整与优化

4.1 边缘探测环节

边缘探测是刃边算法的一个重要环节。刃边算法需要准确探测到各扫描行上刃边交会处的位置,以保证后续提取 ESF、LSF 和计算 MTF 的精度。在传统的刃边法 MTF 评估方法中,由于靶标图像中的刃边基本是平整的直线,为了抑制噪声影响,保证边缘点位置探测精度,通常会对探测到的边缘位置点再进行一次直线拟合。由于受飞行姿态影响,推扫型机载线阵光学载荷所获取刃边图像的刃边边缘点已经不再按照直线规则排列,如果再进行直线拟合,势必导致探测到的边缘点位置发生较大偏移,反而增加计算误差。因此本文对算法的边缘探测环节的处理方法是采用 Fermi 函数^[4]对刃边区域的每一行数据进行边缘点探测,然后不再对探测到的边缘点进行直线拟合,而是直接对各行上探测到的边缘点进行位置配准。

4.2 ESF 提取环节

ESF 提取环节主要有参数化方法和非参数化方法两大类。参数化方法是使用合适的函数模型拟合获取 ESF,但是该方法在实际应用中适应性不好,常常会出现拟合不收敛的情况;非参数化方法不进行拟合,具有更好的适应性^[9]。通常的方法是利用刃边与扫描方向的微小夹角所形成的扫描行之间的微小相移,将边缘位置在同一相移周期内的各行数据按照相移规律合并提取 ESF。

受飞行姿态的影响,推扫型机载线阵光学载荷所获取的刃边图像中各行边缘点的相位规律性不复存在,即各行上边缘点的相位不再呈现单调增加或单调递减的规律性变化,如果仍然使用上述方法提取 ESF 将会导致计算错误。针对这一问题,本文对上述处理方法进行调整,采用对各扫描行进行 3 次

样条插值^[3]并叠加求平均的方式来提取 ESF。尽管该处理方法无法利用行间相移特性增加有效采样点而损失一些计算精度,但是增强了算法在机载条件下的适应性。

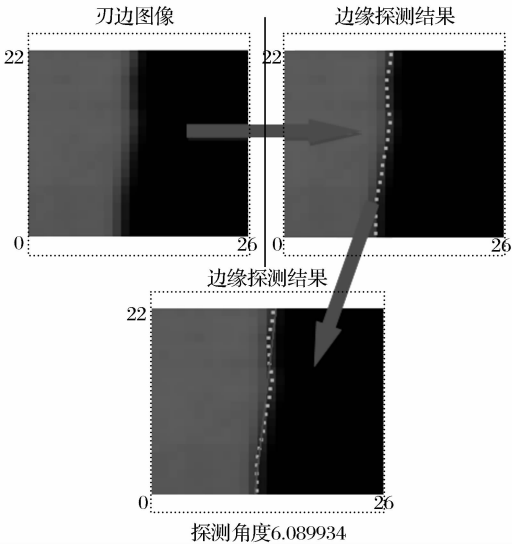


图 4 探测到的边缘点(虚线为边缘点直线拟合结果)
Fig. 4 Detected knife-edge points

此外,为了抑制噪声影响,我们在算法中采用 S-G 滤波器^[10]对提取的 ESF 进行滤波,然后对滤波后的 ESF 进行 LSF 提取与处理。

4.3 LSF 提取与处理环节

在 LSF 提取与处理环节,本文综合考虑抑制噪声、计算精度和处理效率,首先对 ESF 进行直接差分 and 归一化处理以提取 LSF;然后对提取到的 LSF 进行尾部剪裁(即保留主瓣将旁瓣置 0),并进行加汉明窗处理,以降低 LSF 尾部噪声影响和抑制频谱泄漏。

根据以上算法调整与优化,针对机载线阵光学载荷成像特点的算法流程如图 5 所示。

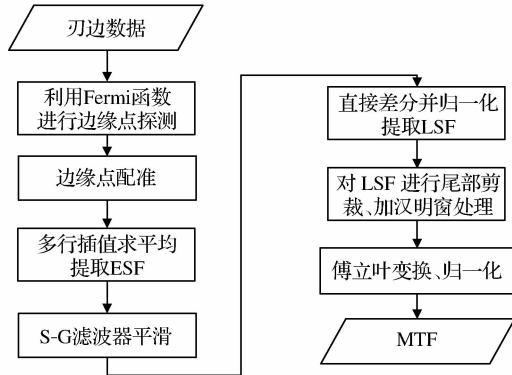


图 5 针对机载线阵光学载荷成像特点的改进算法流程
Fig. 5 Flowchart of the improved algorithm for airborne linear array optical payloads

5 基于机载线阵光学载荷刃边法的精度分析方法

由于载荷在实际运行中无法获得真实的 MTF 值,算法评估精度通常采用仿真分析方法。为了适应推扫型机载线阵光学载荷 MTF 算法精度分析与评估,我们对传统的 MTF 精度分析方法进行了改进^[3,9],即在生成仿真图像时,除了考虑靶标特性因素外(如靶标对比度、尺寸、倾角和噪声),还引入了载荷姿态因素影响。具体步骤如下:

- (1)生成仿真系统点扩散函数 PSF。首先建立仿真系统的成像模型(如二维高斯模型),并输入仿真参数得到亚像元水平的仿真系统点扩散函数 (PSF),计算仿真系统在 Nyquist 频率下的 MTF 仿真值 MTF@Nyquist。
- (2)生成亚像元水平刃边仿真靶标。设定不同的靶标仿真条件(包括靶标尺寸、靶标对比度、靶标倾角和随机噪声等)生成亚像元水平的刃边仿真靶标。
- (3)引入载荷姿态因素。将载荷姿态数据作用于刃边仿真靶标,生成亚像元水平的仿真刃边图像。

(4)生成刃边仿真图像。将步骤(3)生成的亚像元水平仿真刃边图像与步骤(1)中的仿真系统点扩散函数 PSF 进行二维卷积和 CCD 采样处理,得到整像元水平的仿真刃边图像。

(5)MTF 计算与精度评估。利用刃边算法对仿真刃边图像进行 MTF 计算,并将计算结果与仿真值 MTF@Nyquist 进行比较,确定算法计算精度。

飞机的飞行姿态由外方位元素描述,通过外方位元素可以确定载荷成像瞬间在地面直角坐标系中的空间位置。外方位元素可以分为:直线元素和角元素。直线元素描述成像时刻传感器中心在 x 、 y 、 z 方向的空间位置坐标,角元素描述传感器在 x 、 y 、 z 方向上的旋转角度^[10]。在进行载荷飞行验证试验时,飞机沿事先制定好的航线飞行,飞机姿态受气流影响而实时改变,因此载荷成像时刻的直线元素相对确定,而角元素具有不确定性和易变性,并且很难使用确定的函数模型进行准确描述^[11]。图 6、7、8 为随机选取的 2 000 行平稳飞行的载荷 3 个姿态角数据的变化情况。从图中可以看出,姿态角的变化具有随机性,很难使用具体的函数模型来描述。因此,为了正确分析调整优化后的刃边算法评估机载

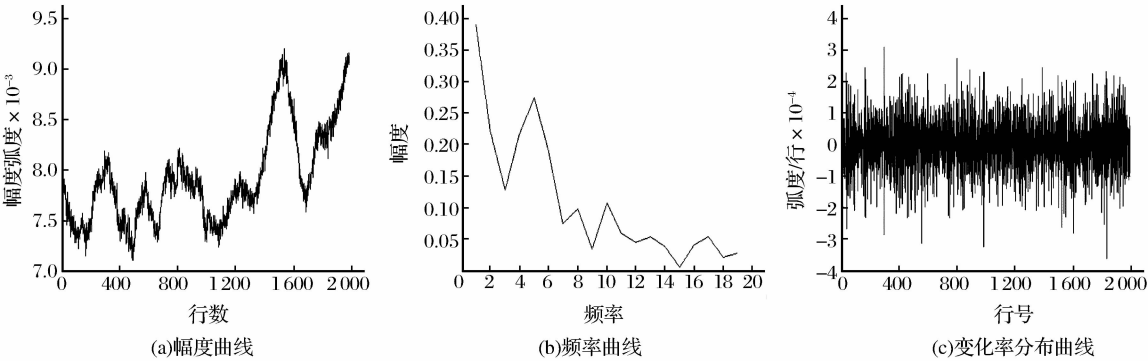


图 6 翻滚角幅度、频率和变化率的分布曲线
Fig. 6 The distribution curve of amplitude, frequency, variation for roll angle

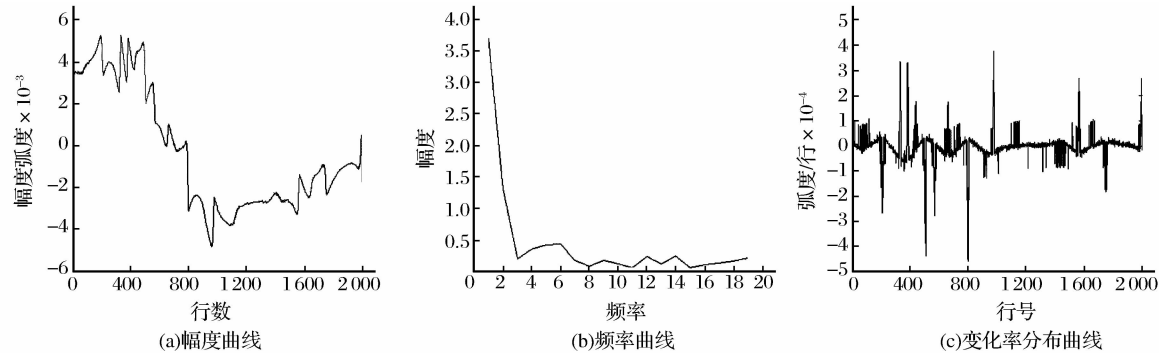


图 7 俯仰角幅度、频率和变化率的分布曲线
Fig. 7 The distribution curve of amplitude, frequency, variation for pitching angle

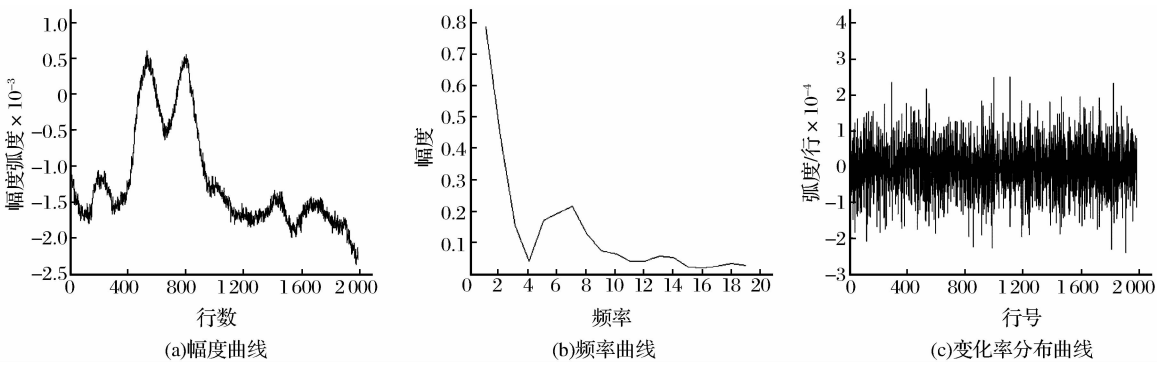


图 8 偏航角幅度、频率和变化率的分布曲线

Fig. 8 The distribution curve of amplitude, frequency, variation for yaw angle

线阵光学载荷 MTF 的精度,我们在仿真精度分析中(步骤(3))使用真实载荷姿态数据生成仿真图像。具体方法如下:

- ①输入步骤(2)生成的仿真刃边靶标。
- ②将载荷的姿态数据 ω 、 κ 、 φ 代入并求解旋转矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

其中:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ a_{12} &= -\cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ a_{13} &= -\sin\varphi\cos\omega & a_{21} &= -\cos\varphi\sin\kappa \\ a_{22} &= \cos\varphi\cos\kappa & a_{23} &= -\sin\omega \\ a_{31} &= -\sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ a_{32} &= -\sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ a_{33} &= \cos\varphi\cos\omega \end{aligned}$$

- ③输入载荷参数(CCD 像元数、尺寸等)建立像平面矩阵,并根据如下推扫式传感器构象方程生成靶标仿真图像^[12]。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_p = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_s + \lambda_p A \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}$$

其中: $(X,Y,Z)_p$ 为地面点在地面坐标系中的坐标, $(X,Y,Z)_s$ 为传感器投影中心在地面坐标系中的坐标, (x,y) 为像平面坐标, f 为载荷焦距, λ_p 为成像比例因子。

图 9 为本文根据上述方法,采用真实姿态数据生成的刃边仿真图像(刃边图像大小为 40×40 像元、刃边倾角为 6° 、亮边 DN 值为 200、暗边 DN 值为 100、SNR 为 70,系统仿真值为 0.1),图 10 为真实的机载刃边靶标图像。从图中可见,利用上述仿真方法生成的仿真图像与真实图像相似,可以正确

反映机载线阵光学载荷成像特点,能够为算法的精度分析提供有效的输入数据。

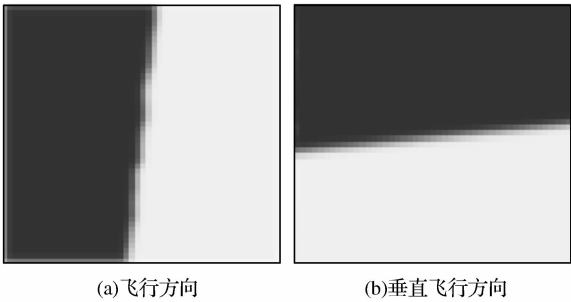


图 9 仿真刃边图像

Fig. 9 The simulation knife-edge images

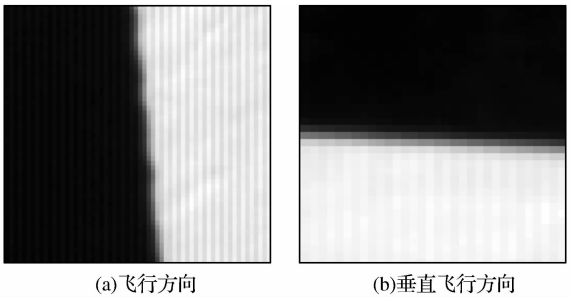


图 10 仿真刃边图像、真实刃边图像

Fig. 10 The real knife-edge images

6 实验与分析

为了分析上述调整优化算法在随机的载荷姿态和随机噪声综合影响下的计算精度和计算稳定性,本文随机选取了 300 组平稳飞行状态下的真实载荷姿态数据生成仿真图像,其中刃边图像尺寸为 40×40 像元,亮边 DN 值 200,暗边 DN 值 100,刃边倾角 6° ,随机噪声标准差分别为 0.5、0.7、1.5,MTF 系统仿真值为 0.1。计算 100 次的 MTF 相对误差结果如图 11 和表 1 所示。

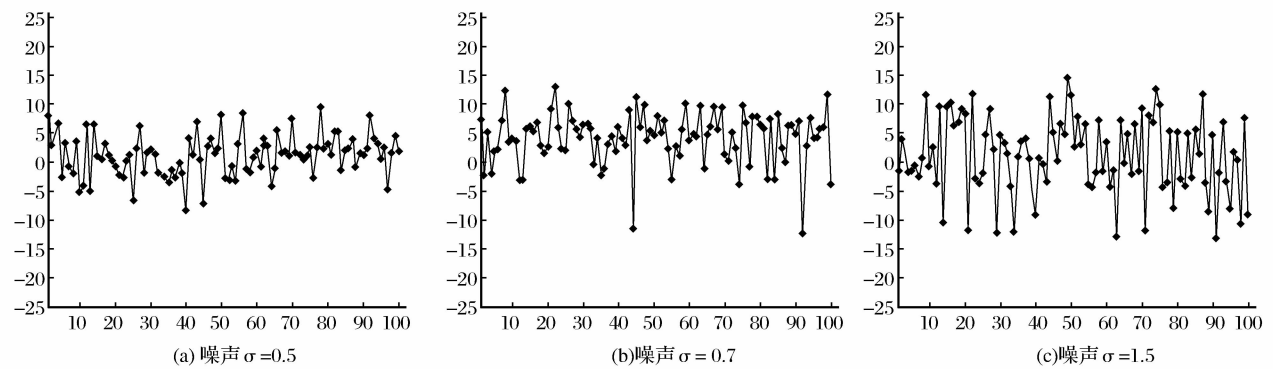


图 11 不同噪声水平下算法精度分析结果

Fig. 11 Accuracy analysis results under different noise levels

表 1 两种方法计算结果统计

Table 1 Results of the two methods

噪声标准差	相对误差	相对误差
	绝对值平均/%	标准差/%
$\sigma=0.5$	0.8014	2.8012
$\sigma=0.7$	1.6361	4.6089
$\sigma=1.5$	-1.3576	6.0196

从上述仿真精度分析结果可以看出,当噪声标准差为 1.5 时,评估精度依然优于 10%。因此,本文针对推扫型机载线阵遥感载荷成像特点对刃边算法所做的调整和优化是可行的,能够保证 MTF 的评估精度,并且有较好的计算稳定性。

7 结 语

本文针对推扫型机载线阵光学载荷成像特点,对刃边法计算 MTF 算法进行了相应的调整与优化,以适用于机载平台下的线阵载荷的 MTF 评估。为了验证算法的适用性和评估精度,本文对精度分析方法进行了改进,引入了姿态因素,并利用真实载荷姿态数据生成仿真刃边图像对该算法的有效性和评估精度进行了验证。精度分析结果表明,调整优化后的算法具有较好的评估精度和计算稳定性,适用于机载线阵遥感载荷的 MTF 评估。

参考文献(References):

[1] Chen Zhengchao. A Research on the Technology of On-orbit Calibration and Validation of China DMC Microsatellite[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2004. [陈正超. 中国 DMC 小卫星在轨测试技术研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2004.]

[2] Wang Qi. A Research on Comprehensive Analysis and Evaluation Technology for On-orbit MTF of Optical Payloads[D].

Beijing: Academy of Opti-electronics, Chinese Academy of Sciences, 2010. [王琦. 光学载荷在轨 MTF 综合分析与评估技术研究[D]. 北京: 中国科学院光电研究院, 2010.]

[3] Li Xianbin. Research on MTF Estimation of On-orbit Optical Payloads[D]. Beijing: Academy of Opti-electronics, Chinese Academy of Sciences, 2007. [李显彬. 在轨有效载荷 MTF 估计相关研究[D]. 北京: 中国科学院光电研究院, 2007.]

[4] Wang Xianhua, Qiao Yanli. Performance Analysis of MTF Measurement for Satellite Optical Camera[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2006, 27(3): 22-27. [王先华, 乔延利. 卫星光学相机 MTF 测量性能分析[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(3): 22-27.]

[5] Helder D L, Choi T. IKONOS Satellite in Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement Using Edge and Pulse Method[J]. Electrical Engineering Department, South Dakota State University, 2002.

[6] Viallefont-Robinet F, Cansot E. SPOT5 MTF Measurement Using Biresolution Images[C]//Proceedings of the SPIE, Gran Canaria: 2004, 5570: 245-255.

[7] Leger D, Viallefont F, Hillairet E, et al. In-flight Refocusing and MTF Assessment of SPOT5 HRG and HRS Cameras[J]. International Symposium on Remote Sensing, International Society for Optical Engineering, 2003, 4881: 224-231.

[8] Li X B, Jiang X G, Zhou C J, et al. An Analysis of the Knife-edge Method for On-orbit MTF Estimation of Optical Sensors[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(17-18): 4995-5011.

[9] Cai Tianjing, Tang Han. Summary on Least Square Fitting Principle of the Savitzky-Golay Smoothing Filter[J]. Digital Communication, 2011, 1(17): 63-68. [蔡天净, 唐瀚. Savitzky-Golay 平滑滤波器的最小二乘拟合原理综述[J]. 数字通信, 2011, 1(17): 63-68.]

[10] Liu Jun, Wang Donghong, Zhang Yongsheng. Analysis of Transformation between HPR and OPK Angles for the GPS/INS System[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(5): 54-56. [刘军, 王冬红, 张永生. GPS/INS 系统 HPR 与 OPK 角元素的剖析与转换[J]. 测绘科学, 2006, 31(5): 54-

56.]

[11] Xin Lijun, Fu Haiqiang, Tang Linlin. Research on the Effect of Aerial Aircraft Flight Attitude on Exterior Orientation Elements[J]. Technological Development of Enterprise, 2010, 29(009): 58. [辛利军, 付海强, 汤淋淋. 航拍飞机飞行姿态对外

方位元素的影响研究[J]. 企业技术开发, 2010, 29(009): 58.]

[12] Sun Jiabing, Ni Ling, Zhou Qijun, *et al.* Principles and Applications of Remote Sensing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. [孙家炳, 倪玲, 周军其, 等. 遥感原理与应用

[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.]

An Optimized MTF Assessment Algorithm based on Airborne Linear Array Optical Payload

Li Chuanrong¹, Xu Hang^{1,2}, Li Xiaohui¹, Zhang Jing^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: MTF (Modulation Transfer Function) is an important indicator that is used to evaluate the performance of the optical remote sensing payload, and the knife-edge method has been used in high resolution optical remote sensing payload on-orbit MTF assessment widely. In this paper, the knife-edge method is improved by the MTF assessment of the Airborne Linear Array remote sensing optical payload. And an improved accuracy analysis method is given by the factors of attitude impacts. With this accuracy analysis method and the use of the real load gesture data, the simulated knife-edge images are made, and assessment accuracy of the improved algorithm is analyzed.

Key words: Edge method; Modulation Transfer Function (MTF); Airborne linear array CCD; Accuracy analyst