

空间 CCD 相机高精度在轨调制传递函数估算

李 进^{1,2} 邢 飞^{1,2} 王 翀^{1,2}

¹清华大学精密仪器系, 北京 100084

²清华大学精密测试与仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 空间电荷耦合器件(CCD)相机在轨调制传递函数(MTF)估算由于噪声影响、边缘方向不够准确以及边缘扩展函数(ESF)构建精度低,而最终导致 MTF 估算精度低,针对此问题提出了一种适于空间 CCD 相机的高精度在轨调制传递函数估算方法。先根据 CCD 动态成像特点建立像移速度模型,求出精确的刃边方向,然后提取出满足要求的刃边图像。在考虑噪声情况下修正调制传递函数理论模型,并提出基于 CCD 相机传递函数参数模型的线扩展函数构建方法,对构建的线扩展函数进行求导和傅里叶变换得到估算的 MTF。实验结果表明,此方法可以高效地在轨估算 MTF,与传统方法相比,MTF 估算的值提高了 28.71%,有效地提升了在轨 MTF 估算精度。

关键词 遥感;空间 CCD 相机;调制传递函数;在轨估算;

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0211003

High-Precision On-Orbit Assessment of MTF for Space CCD Camera

Li Jin^{1,2} Xing Fei^{1,2} Wang Chong^{1,2}

¹Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

²State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Given that on-orbit modulation transfer function (MTF) for space charge coupled device (CCD) camera has the disadvantage of low assessing precision caused by noise in the process of image acquisition, a new high-precision assessment approach of MTF for space CCD camera is proposed. The accurate knife-edge direction is extracted according to the image motion velocity model which is built based on the characteristics of CCD dynamic imaging. The theory model of MTF is corrected when noise is considered. And the line spread function (LSF) is computed based on the parameter transfer function model of CCD camera. The LSF performs the derivative operation and Fourier transform to obtain the MTF. Experimental analysis denotes that the proposed method can efficiently estimate on-orbit MTF. Compared with the traditional knife-edge method, the assessment value of MTF has improvement of 28.71%. The proposed approach can effectively solve the problem of lower precision on-orbit assessment of MTF.

Key words remote sensing; space CCD camera; modulation transfer function; on-orbit assessment

OCIS codes 110.6770; 110.3000; 120.0280

1 引 言

空间电荷耦合器件(CCD)相机的空间分辨率通常采用光学传递函数进行描述^[1-4]。光学传递函数(OTF)是一种光学系统成像保真度的空间频率的复数描述函数^[5-7]。复数光学传递函数的幅值,也称调制传递函数(MTF),是描述成像系统性能最普遍的方法^[8-10]。CCD相机可以近似地看作一个没有相移的低通滤波器。其在轨工作时由于容易受大气环境、离焦、像移失配等不确定因素的影响,CCD相机在轨工作的MTF与实验室

收稿日期: 2014-05-12; 收到修改稿日期: 2014-09-22

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121503, 2012AA121603)、国家自然科学基金(61377012, 60807004)、中国博士后科学基金(2014M550720)

作者简介: 李 进(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事光学成像方面的研究。E-mail: fishhj@126.com

估算的 MTF 相差较大^[11-12]。为了确定 CCD 相机不会经过发射震动、大气到空间转移以及热状态等损坏图像清晰度,以及 CCD 相机刚入轨工作时是否进行调焦、校正等,MTF 必须进行在轨估算。

空间 CCD 相机通常是一种长焦距光学系统,这种系统通常要求 MTF 估算装置的光路径达数十到上百米。这种估算装置可以在实验室使用一个大孔径平行光管实现。然而,CCD 相机在轨工作时平行光管难以应用来估算其 MTF。目前多种在轨估算光学系统的 MTF 方法已经被提出,主要归纳为两大类:1)基于随机噪声目标、点源目标、正弦波目标、边缘目标以及其他目标等的方法^[13-16];2)借助已知 MTF 的相机获取的图像进行估算。为了获得比较好的估算效果,这些方法通常根据相机的地面采样距离(GSD)和推扫方向来选取一个特殊尺寸和方向的目标来估算 MTF。目前普遍认为的在轨估算 MTF 精度高的方法是基于边缘目标的方法^[17-19]。国际 ISO12233 标准推荐使用刃边法^[20],这种方法在 Landsat TM, MOS-1 MESSR, IKONOS 等卫星的光学遥感器中应用,相对其他方法可以获得更准确的估算效果。然而,由于刃边法对图像质量的要求较高,在噪声较大的遥感图像中,估算的 MTF 存在较大的误差,精度较低。

为了提高 CCD 相机在轨工作 MTF 估算的精度和稳健性,提出一种新的高精度的刃边法估算 CCD 相机在轨 MTF。

2 问题描述

刃边法使用图像中一个高对比度的尖峰边缘来估算一维 MTF。MTF 从线扩散函数(LSF)获得,LSF 可由一个点扩散函数(PSF)和线函数二维(2D)卷积获得,即

$$f_{LS}(x) = [\delta(x)l(y)] * f_{ps}(x, y), \quad (1)$$

式中 $\delta(x)$ 是在 x 维方向的狄拉克函数,*为卷积。MTF 可以从 LSF 进行一维傅里叶变换获得,即

$$f_{MT}(\xi, 0) = |\mathcal{F}[f_{LS}(x)]|, \quad (2)$$

式中 ξ 是 x 方向的每毫米线对的空间频率。刃边法估算时,LSF 可以由边缘扩展函数(ESF)或阶跃函数响应获得。ESF 等于 LSF 对 x 的积分,即

$$f_{ES}(x) = \int_{-\infty}^x f_{LS}(x') dx', \quad (3)$$

因此,LSF 可以由 ESF 对 x 求导获得

$$f_{LS}(x) = \frac{d}{dx} f_{ES}(x). \quad (4)$$

ESF 可由图像刃边获得。首先,选取图像中一个边缘子图像,选取的子图像要求为:边缘方向必须主要在沿推扫方向或者跨轨方向,且与主方向有尽可能小的夹角且足够长以便构建适合的 ESF。通常使用边缘检测结合阈值和形态处理算法来识别适当且具有最小角度的边缘,并确定边缘点的位置和角度初始估算,然后以最小二乘拟合直线,将边缘点的位置调整到拟合的直线位置上。其次,使用子图边缘构建 ESF。实际中,存在边缘采样点比较少,导致 ESF 精度低的问题。为了让这些采样信息以连续的方式来表达线扩展函数,需要重构超分辨率边缘。通常采用样条插值的办法来提高边缘分辨率,进而达到过采样目的。然后,可以获得最终的边缘 ESF。

总结上述分析可知,刃边法估算 MTF 方法如图 1 所示。刃边法估算 MTF 主要分为 4 步:1)选取边缘子图像;2)边缘构建 ESF;3)求出线扩展函数 LSF;4)求出 MTF。由刃边法估算 MTF 原理可知,MTF 估算精度主要取决于边缘子图像选取和由选取的边缘构建 ESF。在边缘子图选取时,通过图像中搜索满足选取与跨轨或沿轨方向的夹角最小角度的边缘的方法,实际是一种盲确定边缘法。因此,盲确定边缘法精度比较低。当边缘选定以后,噪声对 ESF 构建影响比较大,最终会使得 ESF 构建误差比较大。ESF 构建时构建超分辨率边缘时会使得噪声放大,导致估算精度降低。同时,CCD 相机在轨工作是动态成像的,像移矢量是实时变化的,最终沿轨和跨轨方向是实时变化的。然而,常用的固定不变边缘选取方法并不足够精确,也会导致 MTF 估算精度下降。另外,普遍采用的基于插值的边缘构建 ESF 精度比较低,也会降低 MTF 估算精度。

考虑到上述问题,为了全面提升 MTF 在轨估算精度,提出一种空间 CCD 相机新的高精度在轨调制传递

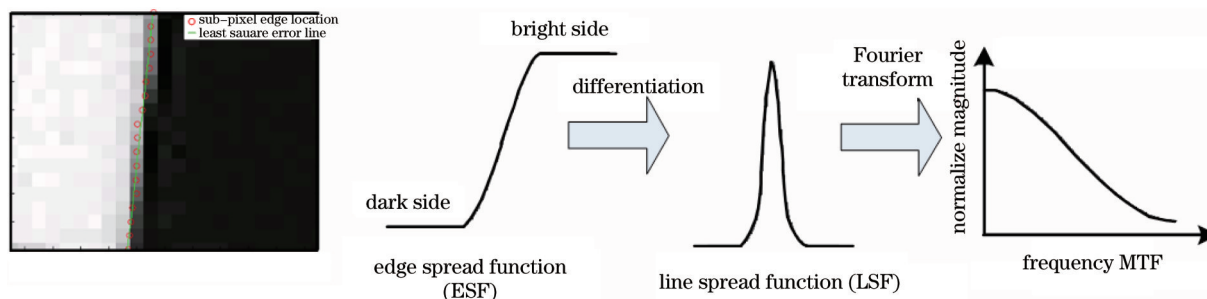


图1 刃边法估算 MTF 原理

Fig.1 Schematic diagram of knife-edge method

函数估算方法。

3 在轨 MTF 估算方法

3.1 噪声影响分析及其降噪方法

将 CCD 相机看作一个线性系统,地物目标与图像的关系可以表示为

$$i(x,y) = l(x,y) * h(x,y), \quad (5)$$

式中 $i(x,y)$ 是图像, $l(x,y)$ 是地物目标, $h(x,y)$ 是相机点扩散函数。对(5)式两边进行傅里叶变换可以得到

$$I(f_x, f_y) = L(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y), \quad (6)$$

式中 $I(f_x, f_y)$ 是图像傅里叶变换, $L(f_x, f_y)$ 是地物目标傅里叶变换, $H(f_x, f_y)$ 为相机传递函数。在实际中考虑噪声时, (5)式表示为

$$i(x,y) = l(x,y) * h(x,y) + n(x,y), \quad (7)$$

在傅里叶域中, (6)式相应地变为

$$I(f_x, f_y) = L(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y) + N(f_x, f_y). \quad (8)$$

CCD 相机可以近似看作一个没有相移的低通滤波器, 相机传递函数通常用传递函数的模, 即调制传递函数表示。如果地面目标 $l(x,y)$ 是已知的, 对于每个非零的 $L(f_x, f_y)$, 传统的传递函数关系为

$$\frac{I(f_x, f_y)}{L(f_x, f_y)} = H(f_x, f_y), \quad (9)$$

(9)式相应地可以变换为

$$\frac{I(f_x, f_y)}{L(f_x, f_y)} = H(f_x, f_y) + \frac{N(f_x, f_y)}{L(f_x, f_y)}, \quad (10)$$

因此, CCD 相机的传递函数可以看作是由信号传递函数和噪声传递函数组成。通常 $L(f_x, f_y)$ 是一个减函数, 随着频率的增加而降低, 噪声传递函数部分 $\frac{N(f_x, f_y)}{L(f_x, f_y)}$ 会随着频率的增加而增加。因此, 在低频段, 噪声传递函数部分远小于信号传递函数部分, 可以忽略不计。在高频段, 噪声部分与信号部分相当甚至大于信号部分传递函数。因此, 在高频时, 噪声会影响传递函数的评估精度, 甚至会破坏传递函数的评估。

对于边缘法评估 MTF 而言, 在边缘时, $l(x,y)$ 可近似为关于 x 或关于 y 的 Heaviside 阶跃函数, 即

$$l(x,y) = a \cdot \text{Hea}(x) + b, \quad (11)$$

两边进行傅里叶变换可以得到

$$L(f_x, f_y) = a \cdot \text{Hea}(f_x) + b \cdot \delta(f_x), \quad (12)$$

根据(11)式可知, 边缘可以看作是一种高频信号。当存在噪声时, 必然影响 MTF 的评估精度。在考虑噪声的情况下, 为了使传递函数关系仍然满足, 图像边缘必须通过与矩形窗函数相乘进行限制, 保证在边缘的频谱的偶次谐波幅值为 0。为了避免(10)式中分子为 0, 矩形窗函数通过 Hanning 窗函数实现, 即

$$w(u) = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi u}{l}\right), & 0 \leq u \leq L \\ 0, & u < 0, u > L \end{cases}, \quad (13)$$

式中 L 为限制的边缘长度。因此,考虑窗函数和采样情况下,传统的传递函数可以修正为

$$i(x, y) = [l(x, y) * h(x, y)] w(x, y) \text{comb}(x, y), \quad (14)$$

式中 $w(x, y)$ 是对应有限区域的窗口, $\text{comb}(x, y)$ 为对应采样的狄拉克梳状函数。经傅里叶变换可以得到

$$I(f_x, f_y) = [L(f_x, f_y) H(f_x, f_y)] * W(f_x, f_y) * \text{comb}(f_x, f_y), \quad (15)$$

因此,可以得到:

$$I(f_x) [a \text{Hea}(f_x) + b \delta(f_x)] * W(f_x) \approx H(f_x), \quad (16)$$

采用相同的办法, f_y 也可以得到类似的关系。

上述方法采用矩形窗函数与图像边缘相乘的办法可以对噪声起到一定的抑制作用。然而对窗口仅可以降低边缘噪声,难以抑制窗口内的噪声。采用 Contourlet 尺度内和尺度间联合降噪的方法对遥感图像进行降噪,来去除噪声对 MTF 估算的影响。首先对遥感图像进行迭代 Contourlet 变换。图像被分解为一个低频子带和一系列高频子带。为了有效地降低噪声,采用 Contourlet 尺度内和尺度间联合降噪的方法。首先,在尺度内,对不同子带系数进行噪声方差估计,来计算阈值,即

$$\lambda = \delta \sqrt{2 \log N}, \quad (17)$$

式中 N 是系数数目, δ 是噪声标准差。 δ 用最高分辨率尺度下每个方向的 Contourlet 系数值来估计。然后,用阈值函数对不同尺度下不同方向的每个子带内的高频系数进行阈值滤波处理,即

$$w_{i,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases}, \quad (18)$$

式中 $w_{j,k}$ 是 Contourlet 系数。如果 Contourlet 系数小于等于阈值 λ , 则该系数为 0, 否则,系数仍然为原系数。其次,对处理后相邻尺度间的子带系数进行相关性方法处理来增强信号,抑制噪声,即

$$R(j, n) = w(j, n) \cdot w(j+1, n), \quad (19)$$

对(19)式的相关系数进行规范化

$$R(j, n)_{\text{norm}} = R(j, n) \sqrt{\frac{\sum_n |w(j, n)|^2}{\sum_n |R(j, n)|^2}}, \quad (20)$$

对相关系数进行滤波处理,相关系数值大于原 Contourlet 系数值时,说明此点处由信号控制,当小于原 Contourlet 系数值时,此点噪声起主要作用,滤去其值,即

$$w(j, n) = \begin{cases} w(j, n), & |R(j, n)_{\text{norm}}| \geq |w(j, n)| \\ 0, & |R(j, n)_{\text{norm}}| < |w(j, n)| \end{cases}. \quad (21)$$

3.2 基于像移速度模型的边缘确定法

MTF 估算时需要搜索边缘的方向与沿轨或跨轨方向夹角尽量的小。CCD 相机在轨成像过程中,卫星的轨道运动,姿态机动和颤振等使得相机光学系统相对地球椭球体表面产生十分复杂的相对运动,加之地球曲面作为相机的体目标,其各物点因不能认为位于同一垂直于光轴物平面,使得动态成像因这些因素的耦合作用发生动态畸变,像移速度场在时间和空间上呈各向异性变化,为了获取清晰的图像采用卫星偏流机构实时调制 CCD 相机跨轨或沿轨方向。因此,CCD 动态成像时沿轨或跨轨方向是实时变化的。

为了高效准确地确定边缘方向,采用像移速度模型来确定边缘方向。地面目标到像面坐标系的 7 个坐标系分别为:地心惯性坐标系,地球坐标系,卫星轨道坐标系,卫星本体坐标系,相机坐标系,像面坐标系,地理坐标系。经过坐标变换:地理坐标系→地球坐标系→地心惯性系→卫星轨道坐标系→卫星本体系→相机坐标系→像面坐标系,将地面目标在地理坐标系中的位置变换到像面坐标系中的像坐标。变换后求得的物

像位置方程为

$$\begin{aligned}
 P'_{ij} = \begin{bmatrix} p'_{1ij} \\ p'_{2ij} \\ p'_{3ij} \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -f'(L_{ij} \cos \eta'_{ij}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f'(L_{ij} \sin \eta'_{ij}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f'(L_{ij} \cos \eta'_{ij}) & -f' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(R+H) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega t & 0 & \sin \omega t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \omega t & 0 & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{gij} - \alpha_0) & 0 & \sin(\alpha_{gij} - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha_{gij} - \alpha_0) & 0 & \cos(\alpha_{gij} - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda_{gij} & \sin \lambda_{gij} & 0 \\ 0 & -\sin \lambda_{gij} & \cos \lambda_{gij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_{gij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{22}
 \end{aligned}$$

式中 f' 是相机焦距, L_{ij} 是景物至光学中心的距离, η'_{ij} 是视线与光轴的夹角, θ 是卫星俯仰角, φ 是卫星横滚角, ψ 是卫星偏航角, R 是地球半径, H 是轨道高度, γ 是卫星飞行的轨道角, i_0 是轨道倾角, ω 是地球自转角速率, $\alpha_{gij}, \lambda_{gij}$ 是视线所指景物点的经、纬度, α_0 是格林尼治经度, R_{gij} 是景物地心距。

将物像位置方程两边对时间 t 微分, 即可求出 t 时刻的像面上各点像移速度

$$V_P = \frac{dP}{dt} = \begin{bmatrix} dP_1/dt \\ dP_2/dt \\ dP_3/dt \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{p3} \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{23}$$

式中 V_{p1} 为像面坐标系中纵向像移速度, V_{p2} 为像面坐标系中横向像移速度, V_{p3} 为像面坐标系中光轴方向像移速度。因此, 可以求得偏流角为

$$\beta = \arctan\left(\frac{V_{p2}}{V_{p1}}\right), \tag{24}$$

求出偏流角即可确定边缘方向。CCD 相机在轨工作时是以行为单位输出的图像, 理论上每一行的像移矢量是不同的。在实际摄像期间是以一个固定频率来调整偏流角的, 该频率远大于 CCD 行频, 因此, 像移矢量相同的行数为

$$n = \frac{f_G}{f_L}, \tag{25}$$

式中 f_G 为卫星向 CCD 相机注入的姿态信息, f_L 为 CCD 行频。在 n 行内像移矢量是相同的, 即 n 行图像边缘方向是固定的, 可以在这 n 行内进行边缘搜索。在相同像移矢量的图像行内搜索边缘会真实符合边缘条件。

3.3 基于传递函数参数模型的 ESF 构建法

ESF 是系统对输入为一个理想边缘的响应。因此, 构建的 ESF 越逼真, 真实估算 MTF 精度越高。构建 ESF 时, 常常出现边缘采样数少的现象。需要将边缘进行超分辨率重建, 如采用样条插值。实际上基于样条插值的方法是一种数值统计分析的方法, 必然对 ESF 的真实性产生影响, 这种方法精度并不高。在此采用一种新的研究思路, 将缺少的采样通过 CCD 相机传递函数参数模型推导获得, 然后构建高分辨率边缘。

定义 CCD 相机传递函数参数模型描述为

$$H_{\text{model}} = H_{\text{diffraction}} H_{\text{optics}} H_{\text{detector}} H_{\text{moving}}, \tag{26}$$

$$H_{\text{diffraction}} = \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \left[\frac{\sqrt{(f_x^2 + f_y^2)}}{D/\lambda F} \right] - \frac{\sqrt{(f_x^2 + f_y^2)}}{D/\lambda F} \left[\sqrt{1 - \frac{f_x^2 + f_y^2}{(D/\lambda F)^2}} \right] \right\}, \quad (27)$$

$$H_{\text{optics}} = \exp \left(-\sqrt{\alpha_x^2 f_x^2 + \alpha_y^2 f_y^2} \right), \quad (28)$$

$$H_{\text{detector}} = \sin \left(\pi \frac{f_x}{f_{sx}} \right) \sin \left(\pi \frac{f_y}{f_{sy}} \right), \quad (29)$$

$$H_{\text{moving}} = \sin \left(\pi \frac{f_y}{f_{sy}} \right), \quad (30)$$

式中 λ 是中心波长, α_x 、 α_y 是取决于边缘方向的参数, f_x 、 f_y 是对应行和列的空间频率, f_{sx} 、 f_{sy} 是对应 x 和 y 的采样频率。

根据传递函数参数模型,构建ESF过程为:首先,计算模型边缘,将上节提取的边缘子图像,根据(11)式计算获得一个实际的边缘;然后根据(26)式计算一维(1D)传递函数 H_{model} ,其中,初始参数 α_x 和 α_y 可以进行设置。一个线扩展函数可以通过这个传递函数的逆傅里叶变换获得。然后根据(5)式可以卷积获得一个模型化的边缘。最优模型化边缘可以通过求 α_x 和 α_y 获得:

$$\min_{\alpha_x, \alpha_y} \frac{1}{2} \| f_{\text{ES,actual}} - f_{\text{ES,model}} \|^2, \quad (31)$$

式中 $f_{\text{ES,actual}}$ 是实际边缘, $f_{\text{ES,model}}$ 是经传递函数参数模型推导而获得的模型边缘。最后将实际边缘中缺少的采样通过传递函数参数模型推导获得模型边缘替代,构建高分辨率边缘,进而获得高精度的ESF。

3.4 MTF 估算新方法

本文提出的CCD相机在轨MTF估算方法如图2所示,整个算法主要分为5步:

- 1) 对CCD图像采用基于Contourlet方法进行降噪,去除噪声对MTF估算影响;
- 2) 根据CCD成像辅助参数计算边缘方向,并提取边缘子图像;
- 3) 根据传递函数 H_{model} 构建最优化模型边缘,然后,将实际边缘和模型边缘结合构建ESF,进而可以获得ESF;
- 4) 对边缘扩展函数一次求导得到线扩展函数;
- 5) 对线扩展函数作傅里叶变换,并进行归一化处理,得到最终的MTF曲线。

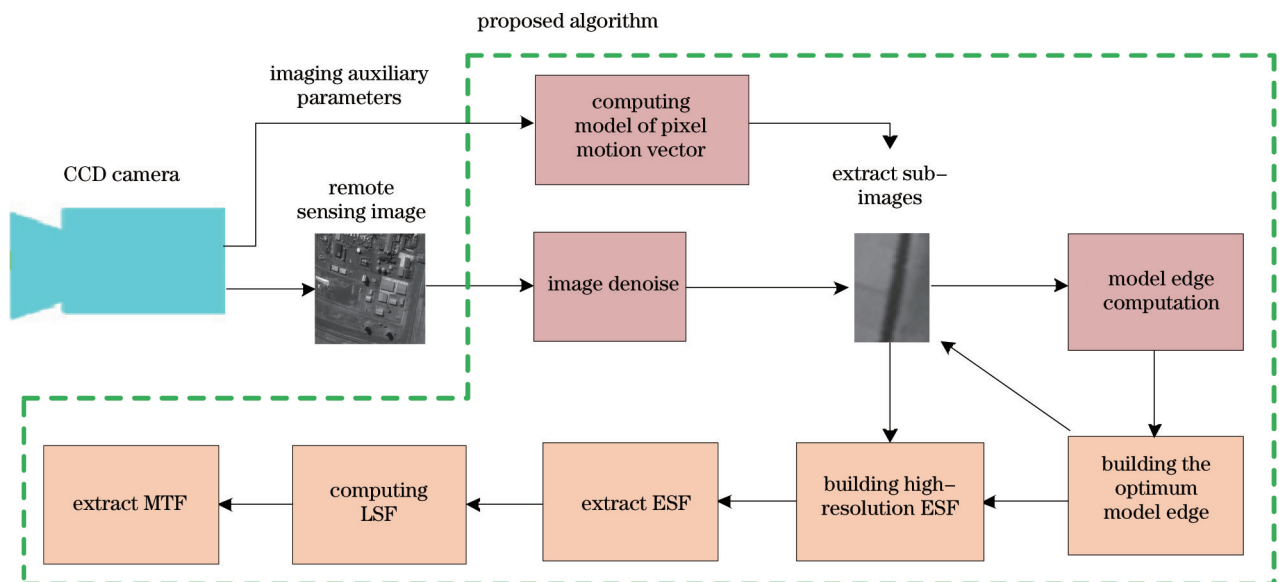


图2 MTF估算新方法

Fig.2 New method of assessment of MTF

4 实验结果与分析

为了验证提出的 MTF 估算新方法,采用时间延迟积分 CCD(TDICCD)相机拍摄图像。首先,采用实验室测试法对相机的 MTF 进行测试。实验室测试是采用靶标条纹,平行光管和转台等设备搭建的 MTF 测试仪,并在暗室下进行测试。实验室测试的 MTF 曲线如图 3 所示。其次,采用提出的新方法估算 MTF。先经像移速度模型提取的刃边边缘如图 4 所示,根据提取的边缘获得的亚像素位置关系如图 5 所示,经过模型边缘重构和归一化灰度值后获得的 ESF 如图 6 所示,求导可获得 LSF 如图 7 所示,最后经傅里叶变换后可获得如图 8 所示的 MTF 曲线。根据图 3 可知,MTF 的平均值为 0.241。而采用提出的方法估算 MTF 在奈奎斯特频率处为 0.187。计算得到估算的 MTF 之所以小于实验室测试的 MTF,是由于估算的 MTF 的图像是在外场成像,由于受到环境的影响,导致 MTF 下降,这与在轨估算 MTF 一致。可见,采用外场成像图像可以模拟在轨 MTF 估算。因此,提出的 MTF 计算方法是正确的。

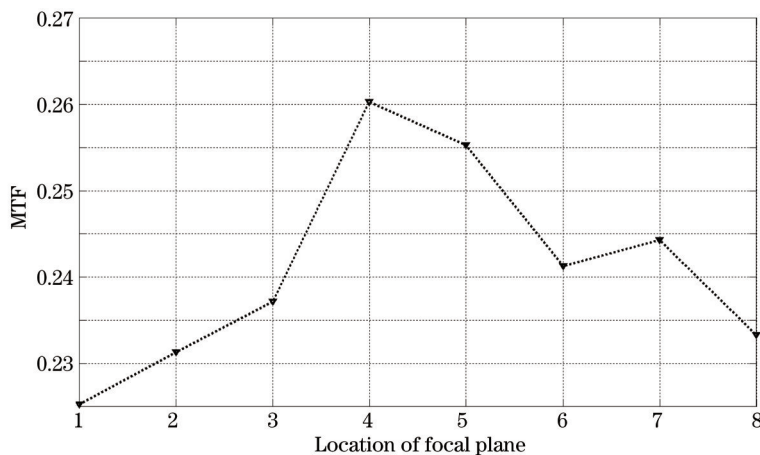


图 3 实验室测试的 MTF

Fig.3 Measurement of MTF in laboratory

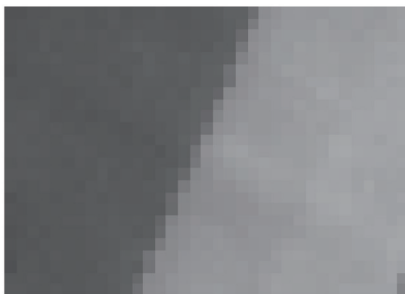


图 4 刃边边缘

Fig.4 Knife-edge

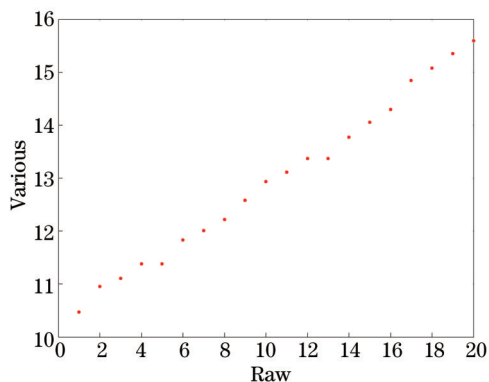


图 5 边缘的亚像素位置

Fig.5 Sub-pixel location of knife-edge

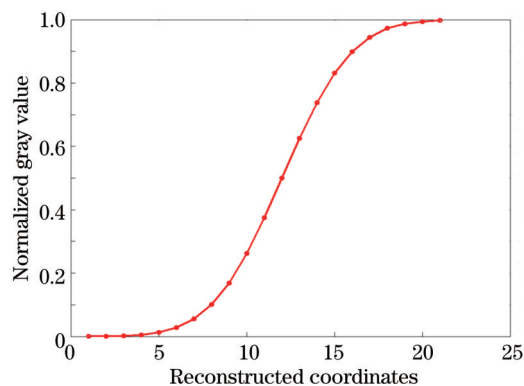


图 6 归一化后高分辨率边缘

Fig.6 Normalized high-resolution edge

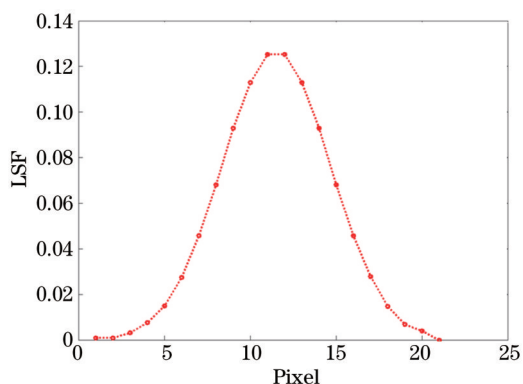


图7 计算获得的LSF曲线

Fig.7 Calculated LSF curve

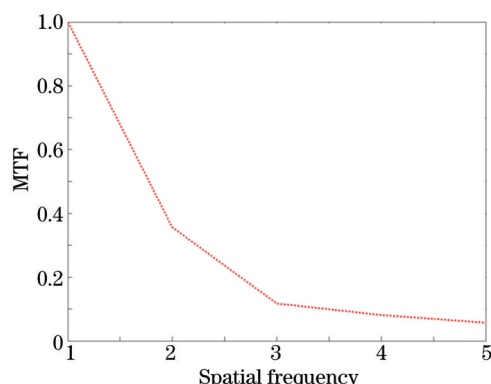


图8 计算获得的MTF曲线

Fig.8 Calculated MTF curve

为了进一步说明提出的MTF估算新方法的正确性,分别采用MTF估算新方法、传统刃边法以及国际MTF提取标准ISO12233中推荐的刃边法对多幅外场成像的遥感图像进行MTF估算。在奈奎斯特频率处的平均MTF比较结果如表1所示。由表1可知,ISO12233方法与传统刃边法效果相当,MTF估算新方法略高于其他两种方法。因此,MTF估算新方法是可行的且估算性能高于其他两种方法。

表1 3种刃边法方法比较结果

Table 1 Comparment of three knife-edge methods

Methods	MTF
Traditional edge method	11.65%
ISO12233 slanted edge method	11.87%
New method	18.76%

为了有效地证明新方法估算性能优于其他两种边缘方法,采用MTF估算新方法和基于ISO12233倾斜边缘方法提取的MTF应用于遥感图像复原中,从图像复原效果来反演MTF提取精度。首先,对遥感图像进行MTF提取,然后根据MTF恢复点扩展函数(PSF)。PSF可以看作整个光学遥感器拍摄图像过程的退化函数,该退化函数包括光学系统、探测器、卫星平台运动、数传以及大气影响等整个光学成像链路过程的退化影响。使用获取的PSF进行滤波复原,如维纳滤波。可见,复原效果取决于MTF提取的精度。因此,通过对遥感图像复原效果可以间接反演提取MTF的方法性能。选取如图9(a)所示遥感图像,根据不同的MTF估算方法计算相应的MTF,然后将估算的MTF恢复PSF。最后,使用维纳滤波方法进行复原图像。图9(b)和(c)为不同方法复原的遥感图像。



图9 不同方法复原图像结果。(a)原图;(b)ISO12233倾斜边缘法;(c)本文法

Fig.9 Restored images based on different methods. (a) Original image; (b) ISO12233 slope-angle knife-edge method; (c) proposed method

对图像从灰度平均值、平均梯度和边缘强度进行统计分析,统计结果如表2所示。由表2可知,采用新方法估算的MTF复原的图像尽管在灰度平均值和ISO12233倾斜边缘法相当,但在平均梯度上和边缘强度上

远高于ISO12233倾斜边缘法。因此,采用新方法提取的MTF复原的效果要比ISO12233倾斜边缘法好,这反映了提取的MTF精度更高。对其他不同纹理程度的遥感图像进行测试得到相同的结果。同理,采用相同的办法,与传统边缘方法进行比较,可以得到相同的结果。

表2 不同方法复原图像效果比较

Table 2 Component of restored results based on different methods

Parameters	Original image	Slope-angle knife-edge method	New assessment method
Gray average	92.13	93.27	93.18
Gradient average	3.89	24.79	32.38
Intensity of edge	23.07	83.34	93.34

最后,为了进一步分析提出的MTF估算新方法性能,与传统刃边法和脉冲法进行比较。选取QuickBird卫星的遥感图像作为测试图像,不同方法提取的MTF曲线如图10所示,在奈奎斯特频率处的MTF如表3所示。由图10和表3可知,新方法比传统方法估算的MTF值提高28.71%。

综上所述,提出的MTF在轨估算新方法是可行的,且估算性能优于其他方法,适合应用于空间相机。

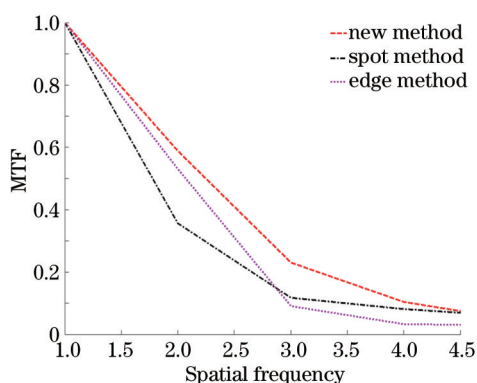


图10 不同方法估算的MTF曲线

Fig.10 Curve of MTF based on different methods

表3 不同方法的奈奎斯特频率处的MTF估算结果

Table 3 MTF assessment result at Nyquist frequency based on different methods

Image	New method	Traditional edge method	Spot method
QuickBird	0.251	0.195	0.178

5 结 论

目前普遍采用的基于刃边法的在轨MTF估算方法由于受噪声影响而估算精度较低。提出了一种基于像移速度模型结合传递函数参数模型的在轨MTF估算方法。提出的估算方法首先采用Contourlet方法进行降噪,其次根据CCD成像辅助参数计算边缘方向,并提取边缘子图像。然后根据传递函数参数模型构建最优化模型边缘,并将实际边缘和模型边缘结合构建ESF,并对ESF执行一次求导得到LSF。最后,对LSF作傅里叶变换,并进行归一化处理,得到估算的MTF。实验结果表明,提出的方法可以高效地在轨估算MTF,与传统刃边、脉冲方法相比,MTF估算的值提高了28.71%。提出的MTF估算方法可为未来在轨相机的MTF估算提供参考。

参 考 文 献

- 1 Z Wang, X Xiong, T Choi, *et al.*. On-orbit characterization of MODIS modulation transfer function using the moon [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7): 4112-4121.
- 2 V N Le, S Chen, Z Fan. Optimized asymmetrical tangent phase mask to obtain defocus invariant modulation transferfunction in incoherent imaging systems [J]. Opt Lett, 2014, 39(7): 2171-2174.
- 3 Nie Pin, Tian Haiying, Dong Bin, *et al.*. Research of modulation transfer function measurement of CCD camera with rectangle target [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1204002.

- 聂 品, 田海英, 董 斌, 等. 矩形靶标测试 CCD 相机调制传递函数的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1204002.
- 4 Liu Zhiming, Zhu Ming, Chen Li, *et al.*. Long range analysis and compensation of smear in sweep aerial remote sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0711001.
刘志明, 朱 明, 陈 黎, 等. 长焦距全景式航空遥感器像拖影分析及补偿抑制方法[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711001.
- 5 K Masaoka, T Yamashita, Y Nishida. Modified slanted-edge method and multidirectional modulation transfer function estimation [J]. Opt Express, 2014, 22(5): 6040-6046.
- 6 M Honda. A method of measuring presampled modulation transfer function using a rationalized approximation of geometrical edge slope [J]. Nihon Hoshasen Gijutsu Gakkai zasshi, 2014, 70(4): 346-358.
- 7 Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of broad width off-axis three mirror optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0722002.
林 晶, 崔庆丰, 朱 浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0722002.
- 8 X Y Jiang, C Pei, X P Yan. Optimization of exit pupil function: Improvement on the OTF of full parallax holographic stereograms [J]. Journal of Optics, 2013, 15(12): 125402.
- 9 C L Hao, S Q Chen, W Zhang. Comprehensive analysis of imaging quality degradation of an airborne optical system for aerodynamic flow field around the optical window [J]. Appl Opt, 2013, 52(33): 7889-7898.
- 10 Jin Guang, Ren Bingwen, Zhong Xing. Influence of distortion on TDI-CCD space camera and its suppression method [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1022001.
金 光, 任秉文, 钟 兴. 畸变对 TDI-CCD 空间相机的影响分析及抑制方法[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1022001.
- 11 J R Alcocer, D M Costa, S G Lazaro. Optical performance of two new trifocal intraocular lenses: Through-focus modulation transferfunction and influence of pupil size [J]. Clinical & Experimental Ophthalmology, 2014, 42(3): 271-276.
- 12 T Choi, X Xiong, Z Wang. On-orbit lunar modulation transfer function measurements for the moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. IEEE, 2014, 52(1): 270-277.
- 13 Gu Xingfa, Li Xiaoying, Min Xiangjun, *et al.*. On-orbit MTF estimation and MTF compensation of CCD camera in CBERS-02 satellite [J]. Science in China, Series E Information Sciences, 2005, 35(B12): 26-40.
顾行发, 李小英, 闵祥军, 等. CBERS-02 卫星 CCD 相机 MTF 在轨测量及图像 MTF 补偿[J]. 中国科学 E 辑 信息科学, 2005, 35 (B13): 26-40.
- 14 F V Robinet, D Léger. Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement [J]. Opt Express, 2010, 18(4): 3531-3545.
- 15 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun, *et al.*. MTF calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2891-2897.
李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2891-2897.
- 16 J Codona. Differential optical transfer function wavefront sensing [J]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 097105.
- 17 M Crespi, L D Vendictis. A procedure for high resolution satellite imagery quality assessment [J]. Sensors, 2009, 9(5): 3289-3313.
- 18 Zhang Peng, Liu Tuanjie, Wang Hongqi. MTF estimation based on system model for linear CCD camera and image recovery [J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 394-398.
张 朋, 刘团结, 王宏琦. 线阵 CCD 相机 MTF 的系统模型估计法与图像复原 [J]. 光学技术, 2009, 35(3): 394-398.
- 19 N Tanaka, J Morishita, N Tsuda. Effect of readout direction in the edge profile on the modulation transfer function of computed radiographic systems by use of the edge method [J]. Radiological Physics and Technology, 2013, 6(2): 474-479.
- 20 H Hwang, Y Choi, S Kwak, *et al.*. MTF assessment of high resolution satellite images using ISO 12233 slanted-edge method [C]. SPIE, 2008, 7109: 710905.

栏目编辑: 张浩佳