

文章编号: 0253-2239(2010)10-2891-07

基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原

李铁成 陶小平 冯华君 徐之海

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 调制传递函数(MTF)是描述光学成像系统信息传递频率特性的一个关键指标。在成像系统满足线性和空间不变性的条件下,对于含有点、狭缝和边缘等不同特征的图像,可以使用相应的方法计算得到成像系统的MTF。采用了倾斜刃边法来计算得到成像系统的MTF,分析了成像器件和算法步骤对计算结果产生的影响,进行了相应的校正,提高了计算结果的准确性。运用MTF补偿(MTFC)技术,分别使用了镜头MTF的设计值、测量值和计算值对实际拍摄得到的图像进行了复原。通过对以上3种复原图进行对比,实验结果证明了MTF计算值的可靠性和用于降质图像复原时的有效性。

关键词 图像处理;调制传递函数;倾斜刃边法;边缘扩展函数;线扩展函数

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.2891

Modulation Transfer Function Calculation and Image Restoration Based on Slanted-Edge Method

Li Tiecheng Tao Xiaoping Feng Huajun Xu Zhihai

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The modulation transfer function (MTF) is one of the key indicators characterizing the signal transfer characteristics of an imaging system as a function of spatial frequency in terms of linear response theory. Various methods have been proposed to determine the MTF of an imaging system which is based on point, slit or edge images. The slanted-edge method to calculate the MTF is used. The method is modified to correct the bias caused by sensor and calculation procedure. The designed MTF, measured MTF, and calculated MTF have all been utilized to restore the remote sensing images by MTF compensation. All of the improved images are compared and the result verifies the effectiveness and reliabilities of the calculated MTF in the restoration of the degraded images.

Key words image processing; modulation transfer function (MTF); slanted-edge method; edge spread function; line spread function

1 引言

调制传递函数(MTF)是用于定性和定量描述一个光学成像系统成像本领的基本物理量。MTF反映了光学成像系统的频率传递特性,它的取值由光学成像系统的衍射效应、光谱成分、像差大小和传感器特性共同决定^[1]。

事实上有多种不同的方法可以用于获取成像系统的MTF。点光源法和狭缝法对光源的亮度和目

标的精度都有较高要求^[2]。相比之下,倾斜刃边法对光源和目标的要求都不高,并且通过倾斜目标刃边,可以得到系统的上采样MTF,大大提高了计算精度^[3]。ISO 12233将倾斜刃边法作为电子静态图像相机分辨率测试的标准方法^[4]。Ehsan Samei等^[5~7]的实验结果表明,倾斜刃边法计算结果的误差最大值不超过1.7%。通过对成像器件和算法步骤等因素的分析,对标准倾斜刃边法进行了修改,增

收稿日期: 2009-11-20; 收到修改稿日期: 2010-01-12

基金项目: 国家973计划(2009CB724006)、国家863计划(2009AA12Z108)和国家自然科学基金(60977010)资助课题。

作者简介: 李铁成(1984—),男,博士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: ironog405@gmail.com

导师简介: 冯华君(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: fenghj@zju.edu.cn

(通信联系人)

加了相应的校正步骤,提高了计算结果的准确性^[8~10]。

调制传递函数补偿(MTFC)指的是通过对成像系统退化过程的分析,建立退化模型,并以此对获得的降质图像进行相应的补偿^[11]。国内外大部分遥感卫星成像系统,例如 IKONOS,OrbView,Pleiades 等都采用了 MTFC 技术以获得高质量的图像。IKONOS-2 卫星成像系统在轨全色谱段 MTF 为 0.02~0.07,经地面 MTFC 标准处理后,MTF 可达 0.10~0.15^[12]。

运用 MTFC 技术,本文分别使用了镜头 MTF 的设计值,测量值和计算值对实际拍摄图像进行了复原。通过对以上 3 种复原图进行对比,对计算传递函数值的可靠性和用于图像复原时的有效性进行了验证。

2 原 理

对于线性不变系统(LIS),当系统的输入为 $f(x,y)$ 时,系统的输出 $g(x,y)$ 是系统输入与系统脉冲响应 $h(x,y)$ 的卷积:

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y). \quad (1)$$

光学系统在近轴成像区可近似看作线性不变系统。假设系统的输入 $f(x,y)$ 是一线脉冲,例如一个平行于 y 轴的线光源 $\delta(x)$,有

$$f(x,y) = \delta(x), \quad (2)$$

系统对于线脉冲的输出响应 $g(x,y)$ 称为系统的线响应或线扩展函数(LSF)

$$L(x) = g(x,y) = \delta(x) * h(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x,\xi) d\xi, \quad (3)$$

式中 $h(x,y)$ 称为系统的脉冲响应或点扩展函数(PSF)。

线响应 $L(x)$ 的一维傅里叶变换等于系统传递函数沿 f_x 轴的截面分布:

$$\mathcal{Q}[L(x)] = \mathcal{Q} \int_{-\infty}^{\infty} [h(x,\xi) d\xi] = H(f_x, 0), \quad (4)$$

式中 $H(f_x, f_y) = \mathcal{Q}[h(x,y)]$ 为系统的传递函数。

特别的,对于脉冲响应是旋转对称的情况,传递函数也是旋转对称的。故只需要一个截面 $H(f_x, 0)$ 就能完全确定系统的传递函数 $H(f_x, f_y)$ 。为了方便起见,下面均使用 $H(f)$ 表示系统的传递函数。

MTF 是系统传递函数的归一化模:

$$M(f) = \left| \frac{H(f)}{H(0)} \right| = \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} L(x) \exp(-j2\pi fx) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} L(x) dx} \right|, \quad (5)$$

线响应 $L(x)$ 等于边缘扩展函数(ESF) $E(x)$ 的导数:

$$L(x) = \frac{dE(x)}{dx}, \quad (6)$$

代入(5)式,得到 ESF 与 MTF 的关系为

$$M(f) = \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dE(x)}{dx} \exp(-j2\pi fx) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dE(x)}{dx} dx} \right|. \quad (7)$$

3 方 法

假设成像系统具有线性及空间不变性,成像器件(CCD 或 CMOS)的像素大小为 p 。当刃边垂直于由成像器件像素组成的行(列)时,行方向上间隔为 p 的两个相邻像素对应于垂直刃边方向上间隔为 p 的两个相邻采样点,即成像器件对刃边的采样间隔为 p ,如图 1 (a) 所示。

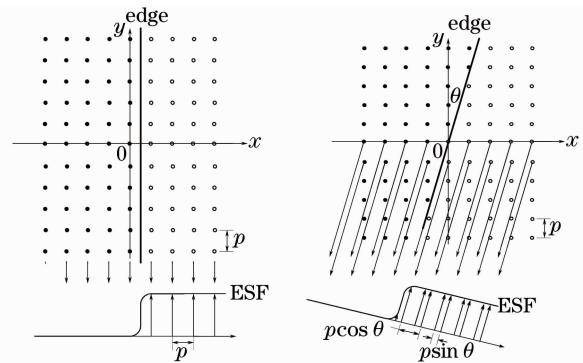


图 1 (a) 刃边垂直于由成像器件像素组成的行;

(b) 刃边与由成像器件像素组成的列相交成角度 θ

Fig. 1 (a) Edge is perpendicular to the row of pixel array of imaging device; (b) edge intersects the column of pixel array at angle θ

倾斜目标刃边,使得刃边与由成像器件像素组成的列(行)相交成一定的角度 θ ,如图 1 (b) 所示。将列方向上的所有像素沿着刃边的倾斜方向投影,列方向上间隔为 p 的两个相邻像素对应垂直刃边方向上间隔为 $p \sin \theta$ 的两个相邻采样点,即成像器件对刃边的采样间隔由 p 变为 $p \sin \theta$ 。同理,将行

方向上的所有像素沿着刃边的倾斜方向投影,行方向上间隔为 p 的两个相邻像素对应垂直刃边方向上间隔为 $p \cos \theta$ 的两个相邻采样点,即成像器件对刃边的采样间隔由 p 变为 $p \cos \theta$ 。

当 $\theta < 45^\circ$ 时,有 $p \sin \theta < p \cos \theta < p$,成像器件对刃边的采样间隔由 p 减小到 $p \sin \theta$ 。通过调整目标刃边与由成像器件像素组成的列(行)相交成的角度 θ ,理论上可以得到任意大小的采样间隔。

3.1 算法流程

首先,在由成像器件采集到的图像中选取 MTF 计算所需要的刃边区域;然后使用有限冲激响应滤波器,计算行(列)方向上 ESF 的导数,即系统的 LSF;计算所选刃边区域中每行(列)LSF 的重心位置,作为刃边区域中每行(列)ESF 的边缘位置,并

对所有边缘位置进行线性拟合;计算每个相位周期所包含的行(列)数,调整刃边区域的行(列)数,使整个刃边区域包含整数个相位周期;将刃边区域中的所有像素点沿着拟合得到的直线方向投影到刃边区域的第一行(列);取原有成像器件采样间隔的 1/4 作为新的采样间隔,对落在同一采样间隔中的所有数据点求几何平均值,用该值来代表该采样间隔的数据信息,从而获得平均上采样 ESF;通过对平均上采样 ESF 求导可得平均上采样 LSF;将平均上采样 LSF 输入汉明(Hamming)滤波器,对输出结果进行离散傅里叶变换(DFT);分析成像器件和算法步骤对计算结果的影响,并进行相应的校正;模的归一化值即为成像系统的 MTF。

程序流程图如图 2 所示。

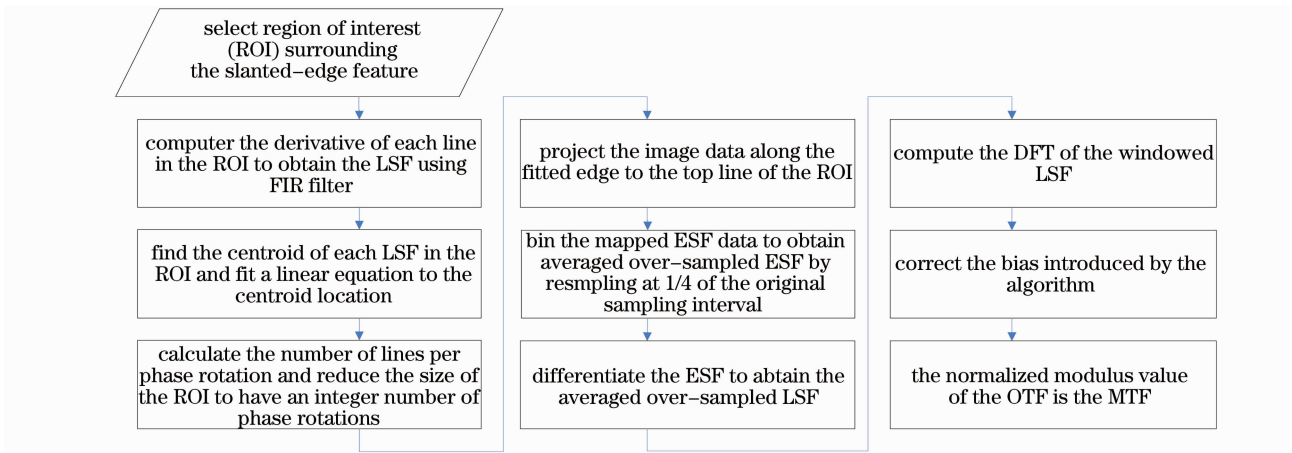


图 2 刃边法计算调制传递函数流程图

Fig. 2 Flowchart of MTF by the slanted-edge method

3.2 结果校正

整个光学成像系统总的 MTF 关系可表示为^[9]

$$M_{\text{calc}}(f) = M_{\text{system}}(f)M_{\text{aper}}(f)M_{\text{diff}}(f), \quad (8)$$

式中 $M_{\text{calc}}(f)$ 为计算得到的 MTF, $M_{\text{system}}(f)$ 为光学系统本身的 MTF, $M_{\text{aper}}(f)$ 为成像器件采样孔径引入的 MTF, $M_{\text{diff}}(f)$ 为算法中有限元差分步骤引入的 MTF。

对于采样孔径为矩形,目标刃边垂直与由成像器件像素组成的行(列)的情况, $M_{\text{aper}}(f)$ 为

$$M_{\text{aper}}(f) = \sin(\pi fW)/(\pi fW), \quad (9)$$

式中 W 为成像器件像素的宽度。对于采样孔径为矩形,目标刃边与由成像器件像素组成的列(行)相交成角度 θ 的情况, $M_{\text{aper}}(f)$ 为^[10]

$$M_{\text{aper}}(f) = \frac{\sin(\pi fW)}{\pi fW} \cdot \frac{\sin[2\pi fH \sin(\theta/2)]}{2\pi fH \sin(\theta/2)}, \quad (10)$$

式中 H 为成像器件像素的高度。 $M_{\text{diff}}(f)$ 为^[11]

$$M_{\text{diff}}(f) = \frac{\sin(\pi f\Delta)}{\pi f\Delta}, \quad (11)$$

式中 Δ 为成像器件的采样间隔。

计算过程中,将每个采样点在行(列)方向上与刃边的水平(垂直)距离作为这个采样点到刃边直线的距离,这相当于在空域对 ESF 进行了拉伸。空域的展宽对应于频域的压缩,这将引起 MTF 在频率域的尺度变化。倾斜刃边引入的 MTF 在频率域的压缩可进行校正:

$$M_{\text{corr}}(f) = M_{\text{calc}}(f \cos \theta), \quad (12)$$

式中 $M_{\text{calc}}(f)$ 为计算得到的校正前的 MTF, $M_{\text{corr}}(f)$ 为校正后的最终 MTF。

通过校正,可以排除成像器件,算法步骤等种种因素对计算结果的影响,得到更加准确的 MTF 值。

4 实验结果

4.1 仿真结果

为了检验结果校正的有效性和评价计算结果的

准确性,使用已知大小的点扩展函数(PSF)对理想刃边图像进行退化。PSF的横截面如图3(a)所示;图3(b)是基于该PSF退化得到的刃边图像。

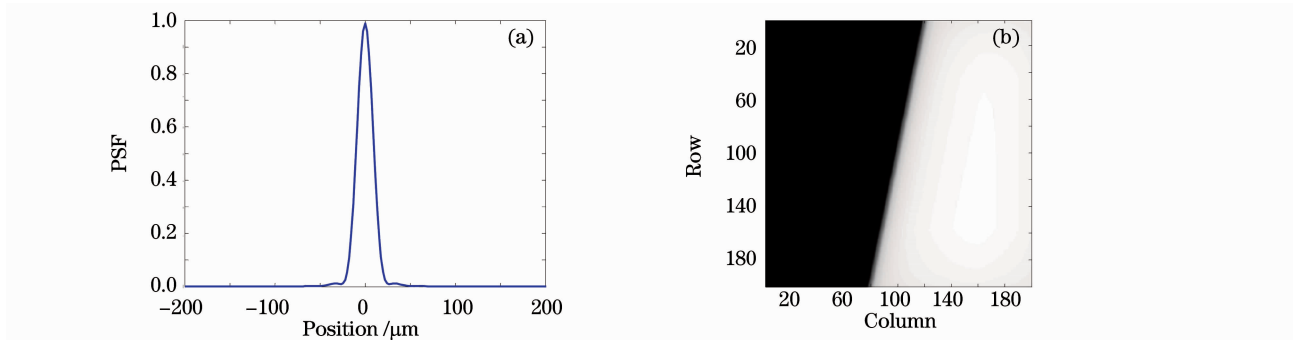


图3 (a) PSF的横截面;(b)退化刃边图像

Fig. 3 (a) Cross section of PSF; (b) degraded edge image

分别使用了ISO 12233中的标准倾斜刃边法和加入校正步骤后的改进倾斜刃边法对退化图像进行了MTF的计算。上述两种方法的MTF计算结果

如图4(a)所示;图4(b)是上述两种方法的计算结果与MTF真实值之间的误差。

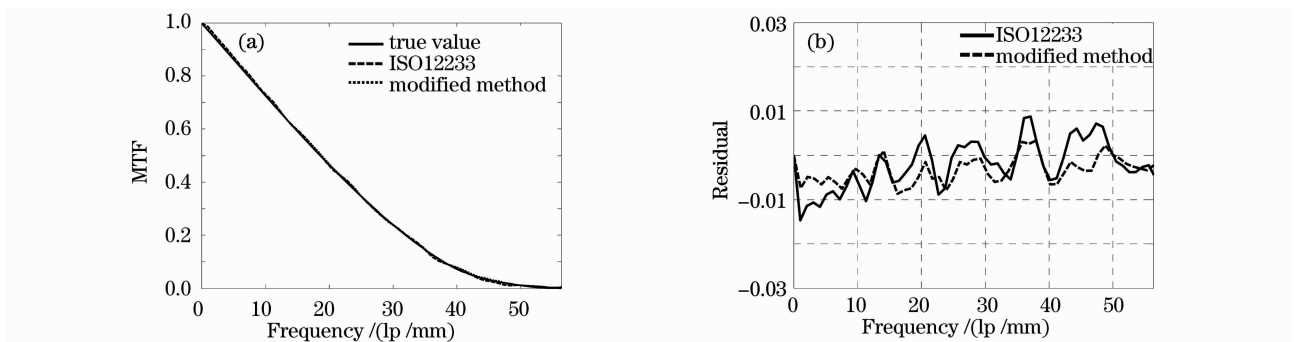


图4 (a)改进前后MTF计算结果对比;(b)改进前后MTF计算结果与真实值的误差

Fig. 4 (a) MTF comparison of standard and modified method; (b) difference between calculated and theoretical MTF

上述两种方法的计算结果与MTF真实值之间误差的最大值 E_{\max} ,平均值 E_{mean} 和均方根值 E_{rms} 如表1所示。

表1 改进前后MTF计算结果与真实值误差的最大值、平均值和均方根值

Table 1 E_{\max} , E_{mean} , E_{rms} error between calculated and theoretical MTF

	E_{\max}	E_{mean}	E_{rms}
ISO12233	0.0147	0.0048	0.0059
Modified method	0.0087	0.0039	0.0045

从表1可以看到,改进后的倾斜刃边法的MTF计算结果与真实值之间的误差最大值为0.0087,误差平均值为0.0039,与Samei等的实验结果相近;与标准倾斜刃边法相比,改进后的方法在误差最大值、平均值和均方根值上,均有一定程度的下降,证明了校正结果的有效性和计算结果的准确性。

4.2 实验装置

完成长焦距小孔径成像镜头设计与加工,光学系统采用双胶合镜头设计,使用656.3,587.6和486.1 nm三种波长。镜头 $f' = 387.7$ mm,最小 F 数 $F = 15$,并设置可调光圈 $F = 22$ 和32,镜片高度46.00 mm,总厚度14.00 mm,孔阑半径12.92 mm,工作距离463.92 mm。设计视场半角度为 2° ,实际使用视场半角度为 1° 左右。

当 $F = 22$ 时,在中心视场处,图5(a)是镜头MTF的设计值;图5(b)是在测试波长为632.8 nm的情况下,镜头加工完成后MTF的实际测量值。

为了便于由特征图像提取边缘以计算PSF和MTF,选购了一款像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$,动态范围为66 dB的CCD。同时为了便于调焦,镜头和CCD之间的机构由螺纹进行连接。

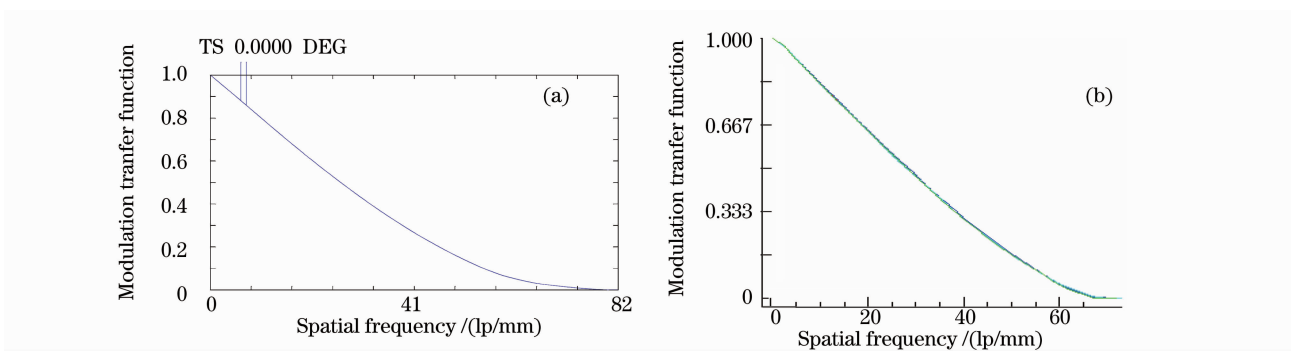


图 5 $F=22$, 中心视场处镜头的 MTF。(a) 设计值; (b) 测量值

Fig. 5 (a) MTF at 0 field of view and $F=22$. (a) designed MTF; (b) measured MTF

4.3 实验结果

一块透射式标版被用作目标物体。图 6 (a)是由

CCD 相机获取到的标版像;从标版像中提取出来用于 MTF 计算所需要的刃边区域如图 6 (b)所示。

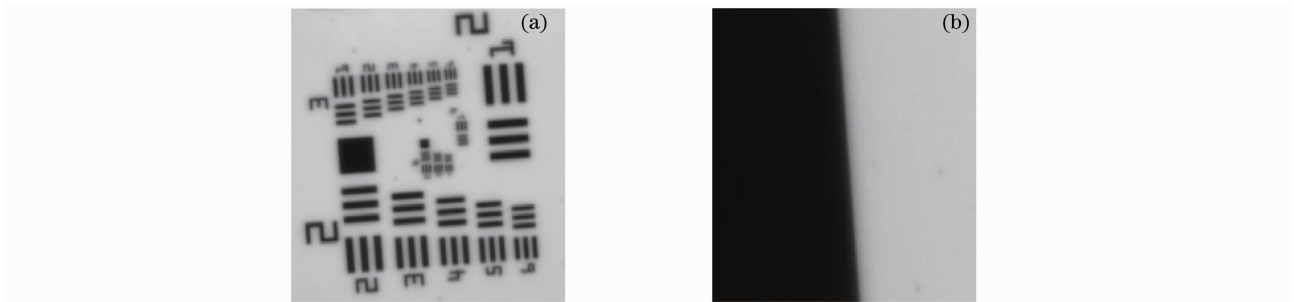


图 6 (a) 标版像; (b) 计算所需要的刃边区域

Fig. 6 (a) Bar pattern image; (b) region of interest in need of th calculation

使用刃边法计算成像系统的 MTF, 结果如图 7 中点线所示。成像镜头 MTF 的设计值和测量值如图 7 所示。

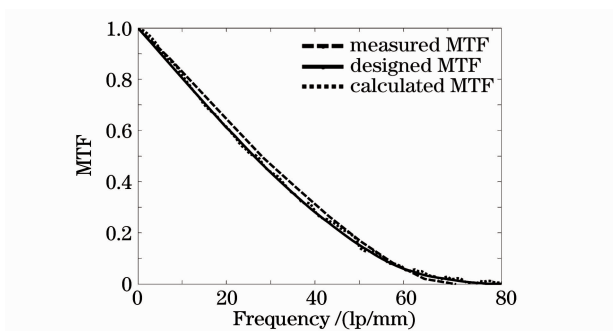


图 7 镜头 MTF 的设计值、测量值和计算值

Fig. 7 Comparison of designed, measured and calculated MTF

从图 7 可以看到, MTF 计算值与设计值比较接近, 两者都与测量值存在一定差异。镜头的实际加工、装配误差可能导致 MTF 设计值和测量值上的差异; 而实验拍摄时候的对焦不准, 成像器件的前期采

集和后期处理, 算法步骤等则可能导致 MTF 测量值和计算值上的差异。

4.4 降质图像的复原

在大多数情况下, 当得到一幅退化图像时, 无法得知成像系统的基本特性 (例如 PSF、MTF 等), 这将会给图像复原带来极大困难, 即使基于一般的先验知识, 也很难得到令人满意的复原效果。而通过刃边法计算退化图像的 MTF, 并基于该计算值对退化图像进行 MTFC, 实验证明能够有效提高降质图像的质量。

图 8 (a) 是退化图像盲复原的结果; 图 8 (b) 是基于 MTF 计算值的复原结果。

从图 8 可以看到, 由于对模糊核缺乏准确的估计, 在不断的迭代过程中, 盲复原的结果存在较为严重的振铃现象, 而相比之下, 基于 MTF 计算值的恢复结果则要好多。

运用高调制传递函数补偿 (MTFC) 技术, 分别使用了镜头 MTF 的设计值, 测量值和计算值对实际拍摄图像进行了复原。标版图复原结果如图 9 所示。

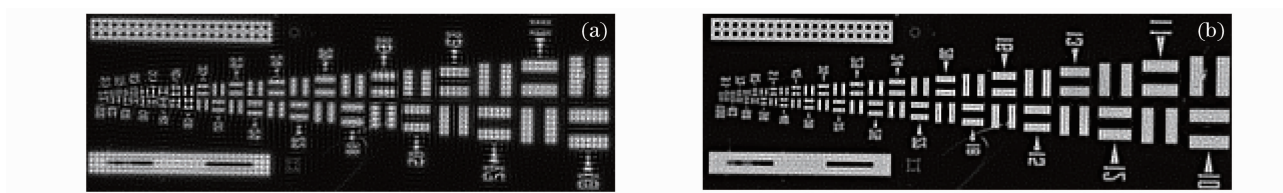


图 8 (a) 退化图像盲复原结果;(b) 基于 MTF 计算值的复原结果

Fig. 8 (a) Restored result of the degraded image using blind deconvolution; (b) restored image based on calculated MTF

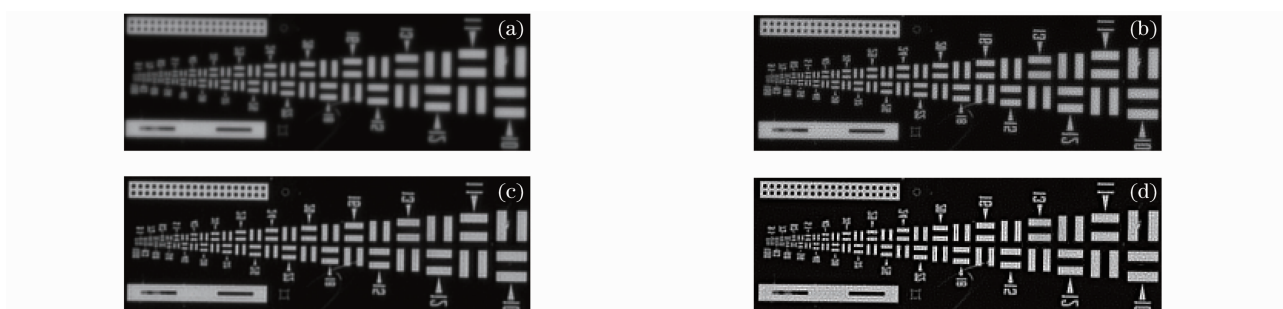


图 9 (a) 标版图;(b) 基于设计值的复原;(c) 基于测量值的复原;(d) 基于计算值的复原

Fig. 9 (a) Bar pattern image; (b) restored image based on designed MTF;

(c) restored image based on measured MTF; (d) restored image based on calculated MTF

针对基于 MTF 设计值、测量值和计算值得到的 3 种复原图像,分别进行了 MTF 的计算,结果如图 10 所示。遥感图复原结果如图 11 所示。

从图 9 和图 11 可以看到,基于 MTF 计算值得到的复原图像,与复原前相比,在细节(对应图像中高频成分)表现上有了一定程度的提升;与基于设计值和测量值得到的复原图像相比,三者对图像细节的提升能力基本相近。

调制传递函数面积(MTFA)是用来描述一个光学成像系统整体分辨本领的物理量^[13]。它的大小可由 MTF 曲线与频率轴围成区域的面积计算得到。MTFA 常常被用来作为评价复原结果好坏

的一个重要指标。复原前后 56 lp/mm 处 MTF 和 MTFA 的变化如表 2 所示。

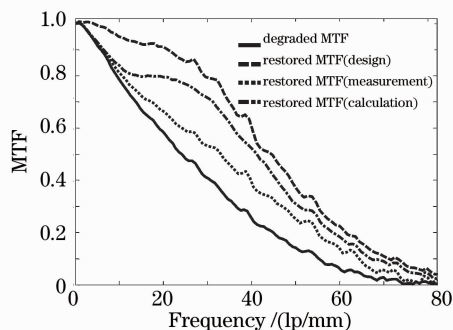


图 10 复原前后 MTF 的变化

Fig. 10 MTF comparison of degraded and restored image

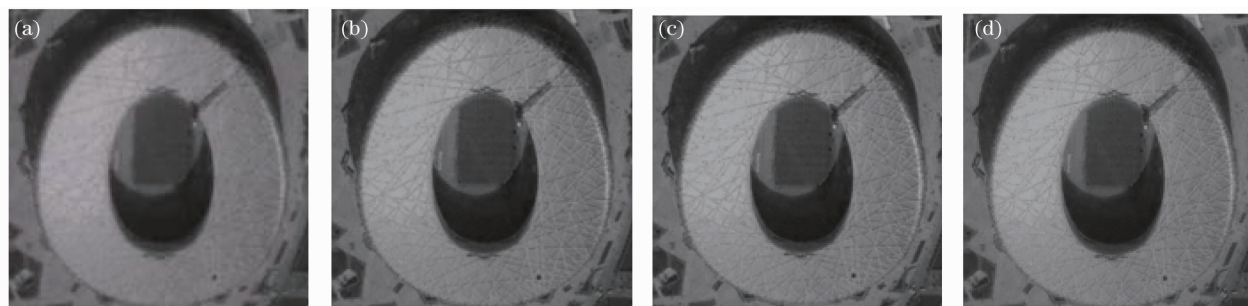


图 11 (a) 遥感图;(b) 基于设计值的复原图;(c) 基于测量值的复原图;(d) 基于计算值的复原图

Fig. 11 (a) Remote sensing image; (b) restored image based on designed MTF;

(c) restored image based on measured MTF; (d) restored image based on calculated MTF

表 2 复原前后 56 lp/mm 处的 MTF 和 MTFA 值
Table 2 MTF and MTFA values at 56 lp/mm of degraded and restored image

$f = 56$ lp/mm	Degraded image	Restored image based on designed MTF	Restored image based on measured MTF	Restored image based on calculated MTF
MTF	0.1014	0.2416	0.1884	0.2237
MTFA	47.47	72.53	56.51	66.24

从表 2 可以看到,基于 MTF 设计值、测量值和计算值得到的 3 种复原图像,与原图相比,在 56 lp/mm 处的 MTF 和 MTFA 值均有了一定程度的提高,表明图像的细节部分均得到了一定程度的提升,与图 9 和图 11 中人眼观测到的效果基本一致。设计值和计算值复原效果比较接近的原因是 MTF 设计值与计算值比较接近;两者的复原效果在数值上优于测量值复原效果,并不表示复原效果一定较后者更好,还要综合考虑复原后振铃效应等对 MTF 计算的影响。

5 结 论

采用了倾斜刃边法来计算得到降质图像的 MTF 值。通过对成像器件和算法步骤等种种因素的分析,对刃边法进行了修改,增加了相应的校正步骤,提高了计算结果的准确性。运用 MTFC 技术,分别使用了镜头 MTF 的设计值,测量值和计算值对实际拍摄图像进行了复原。通过对以上三种复原效果进行比较,发现计算值复原效果与设计值和测量值的复原效果基本相似。实验结果表明,将刃边法计算得到的成像系统的 MTF 用于降质图像的复原,能够有效地提升降质图像中的细节程度,有助于我们在不了解成像系统具体参数的情况下,对采集到的降质图像进行复原以提高分辨率。

参 考 文 献

1 Zhuang Songlin, Qian Zhenbang. Optical Transfer Function[M]. Beijing: China Machine Press, 1981

庄松林, 钱振邦. 光学传递函数[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981

2 Jeffrey T. Olson, Richard L. Espinola, Eddie L. Jacobs. Comparison of tilted slit and tilted edge superresolution modulation transfer function techniques[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(1): 016403

3 Stephen E. Reichenbach, Stephen K. Park, Ramkumar Narayanswamy. Characterizing digital image acquisition devices [J]. *Opt. Engng.*, 1991, **30**(2): 170~177

4 International Organization for Standardization. ISO 12233:2000, Photography—Electronic Still-Picture Cameras—Resolution Measurements[S].

5 Ehsan Samei, Nicole T. Ranger, James T. Dobbins *et al.*. Intercomparison of methods for image quality characterization. I. modulation transfer function [J]. *Med. Phys.*, 2006, **33**(5): 1454~1465

6 Ann-Katherine Carton, Dirk Vandenbroucke, Luc Struye *et al.*. Validation of MTF measurement for digital mammography quality control [J]. *Med. Phys.*, 2005, **32**(6): 1684~1695

7 Andrew D. A. Maidment, Michael Albert. Conditioning data for calculation of the modulation transfer function [J]. *Med. Phys.*, 2003, **30**(2): 248~253

8 P. B. Greer, T. van Doorn. Evaluation of an algorithm for the assessment of the MTF using an edge method [J]. *Med. Phys.*, 2000, **27**(9): 2048~2059

9 T. Villafana. Effect of microdensitometer scan slit misalignment in MTF determinations [J]. *Med. Phys.*, 1975, **2**(5): 255~258

10 I. A. Cunningham, A. Fenster. A method for modulation transfer function determination from edge profiles with correction for finite element differentiation [J]. *Med. Phys.*, 1987, **14**(4): 533~537

11 H. Hwang, Y. W. Choi, S. Kwak *et al.*. MTF assessment of high resolution satellite images using ISO 12233 slanted-edge method [C]. *SPIE*, 2008, **7109**: 710905

12 T. Choi. IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method [D]. Brookings: South Dakota State University, 2002

13 Shashadhar M. Mohapatra, Jeff D. Turley, John R. Prince *et al.*. Transfer function measurement and analysis for a magnetic resonance imager [J]. *Med. Phys.*, 1991, **18**(6): 1141~1144