正态分布模拟倾斜刃边图像的MTF测量方法

袁航飞[1,2] 郭永飞[1] 司国良[1] 李云飞[1] 曲立新[1]

[1]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033

[2]中国科学院大学,北京 100049

摘要 调制传递函数(MTF)是评价光学成像系统信息传递频率特性的一个关键指标,倾斜刃边法是测量MTF的主要方法之一。为了解决传统倾斜刃边法对噪声图像边缘角度估计的不准确性,提出了一种基于正态分布拟合和中值点查寻的MTF测量新算法。通过正态分布函数模拟一幅与实际图像误差最小的模拟图像,利用中值点查寻法对模拟图像处理,求得最佳刃边角度,利用该角度求出实际图像的边缘扩散曲线,再通过费米函数拟合获得边缘扩散函数(ESF)。由实验结果可以看出,在图像噪声较大的情况下,对倾斜刃边角度估计的准确度得到了明显提升,进而也提高了MTF的测量精度。

关键词 成像系统; 调制传递函数; 倾斜刃边法; 正态分布; 边缘扩散函数; ISO 12233

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0712001

MTF Measurement Method Based on Slanted-Edge Image Simulated by Normal Distribution

Yuan Hangfei[1,2] Guo Yongfei[1] Si Guoliang[1] Li Yunfei[1] Qu Lixin[1]

[1]*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jinlin* 130033, *China*

[2]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract The modulation transfer function (MTF) is one of the key indicators to evaluate the signal transmission frequency characteristics of an optical imaging system, and the slanted-edge method is one of the important MTF measurement methods. To solve the problem that the traditional slanted-edge measurement method is not robust against noise, a new MTF measurement method based on the normal distribution fitting and median point estimate is proposed. A modified method that estimates the edge angle by fitting a two-dimensional function to the image data based on the normal distribution is proposed, the optimum slope angle and edge-spread curve of the actual image are calculated by using the method of looking up median point to the fitted image, and the edge-spead function (ESF) is achieved by using the Fermi function. The experimental result shows that the precision of the edge angle of the modified method is improved obviously when the noise of the actual image is relatively seriously, and the precision of the value of the MTF is also increased.

Key words imaging systems; modulation transfer function; slanted-edge method; normal distribution; Edge-spread function; ISO 12233

OCIS codes 120.4630; 120.4800; 110.4850; 040.1520

1 引 言

航天遥感相机是高精度、高灵敏度、高分辨率的光学成像系统[1],测定一部航天遥感相机的成像质量是

收稿日期: 2014-12-03; **收到修改稿日期**: 2015-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)

作者简介: 袁航飞(1988-),女,博士研究生,主要从事CCD、图像处理方面的研究。E-mail:yhfciomp@163.com

导师简介: 郭永飞(1961-),男,研究员,博士生导师,主要从事CCD在计算机中的应用等方面的研究。

E-mail:guoyf@ciomp.ac.cn

评价航天遥感相机性能的重要步骤[2]。对相机成像质量的评价指标有很多，其中调制传递函数（MTF）是最重要的指标之一，它反映了航天相机的空间分辨能力[3]。MTF是空间频率的函数，反映了相机的频率传递特性，是相机对不同空间频率的正弦曲线的定量响应[4]，它的取值由光学成像系统的像差大小、衍射效应和传感器特性共同决定。MTF曲线直观地反映出相机在不同空间频率下的响应度，随着目标空间频率的增加，MTF逐渐下降，因此在目标空间频率较高时，成像质量变差，图像变得模糊[5]。

对于光学镜头倍率和口径不同的光学系统而言，理论MTF值容易估计不准，因此需要在多倍率下分别对光学系统进行MTF测量。随着MTF测量技术和理论的日益成熟，国内外出现了许多测量光学传递函数的仪器，如SCH-1光学传递函数测量仪、MTF-Test Stations、Variant视频MTF测量仪等，这些测量仪器功能多样且测量MTF的精度和重复性均小于±0.02，但是它们也存在一些不足，比如测量仪器体积大，测量数据时间长，实验前和实验过程中调节复杂，价格昂贵。为了弥补这些不足，基于图像处理的MTF测量技术成为了发展趋势，这种方法通过相机对目标成像，再经过物和像的频谱对比，获得MTF，这种测量方法与光学传递函数的定义直接相对应，在原理上没有任何误差。基于图像处理的MTF测量方法有点光源法、线光源法、刃边法。点光源法和线光源法对目标光源的精度要求很高，难以实现。相比之下，刃边法则很容易实现。刃边法分为垂直刃边法和倾斜刃边法。垂直刃边法的缺点是刃边只经过一列像元，有效采样点较少，拟合边缘扩散函数(ESF)的灰度值采样频率较低，导致MTF测量结果不够精准。倾斜刃边法涵盖了多种边缘情况，ISO 12233将倾斜刃边法作为相机分辨率测试的标准方法，现已被广泛应用于相机的MTF测量[6]。在倾斜刃边法中，边缘倾斜角估计和ESF拟合是最关键的步骤，其准确度对MTF的测量结果影响很大。ISO 12233定义的倾斜刃边法没有考虑噪声的影响，在成像噪声较大时，该方法无法准确估计倾斜刃边的角度，导致方法失效，所以使用该方法进行MTF测量前需对实际图像进行去噪处理，而去噪会造成图像失真，同样会给刃边角度的估计带来误差[7]。

本文提出了一种基于正态分布模拟和中值点查寻的倾斜刃边法：1) 通过正态分布函数模拟一幅与实际图像误差最小的模拟图像；2) 对模拟图像进行中值点查询处理，求得最佳刃边角度；3) 根据最佳刃边角度绘出实际图像的边缘扩散曲线；4) 用多个费米函数拟合获得ESF。该方法减小了噪声对刃边角度估计的影响，提高了ESF曲线的拟合精度，MTF的测量准确度也得到了提升。

2 MTF测量原理

2.1 MTF定义

MTF是光学系统对不同空间频率正弦波的定量响应[8]。图1为不同频率的正弦波靶标。相机对正弦波靶标成像时，受相机空间分辨率的限制，图像的调制度较靶标的调制度相比会降低[9]。调制度M的定义为

$$M=\frac{A_{\max}-A_{\min}}{A_{\max}+A_{\min}},\tag{1}$$

式中$A_{\max}$是正弦波强度的极大值，$A_{\min}$是正弦波强度的极小值，M的取值范围0~1。当相机对频率为ξ的正弦波靶标成像时，光学系统的MTF可表示为图像调制度与靶标调制度之比[10]

$$F_{\mathrm{MT}}(\xi)=M_{\mathrm{image}}(\xi)/M_{\mathrm{object}}=\frac{A_{\mathrm{i,max}}-A_{\mathrm{i,min}}}{A_{\mathrm{i,max}}+A_{\mathrm{i,min}}}/\frac{A_{\mathrm{o,max}}-A_{\mathrm{o,min}}}{A_{\mathrm{o,max}}+A_{\mathrm{o,min}}}.\tag{2}$$



图1 不同空间频率的正弦波靶标

Fig.1 Sine wave target of spatial frequencies

受光学系统传感器像元大小、镜头口径、衍射效应和像差大小等的限制，$M_{\mathrm{image}}(\xi)$随着目标空间频率的增大而减小，由(2)式可知，$F_{\mathrm{MT}}(\xi)$也会随着目标空间频率的增大而逐渐减小[11]，如图2所示。因此，当目标空间频率较大时，图像所反映出的信息就会变模糊[12]。

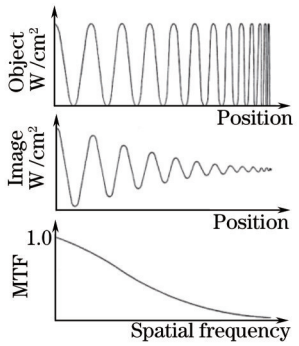


图2 随着频率的增加,调制度逐渐衰减

Fig.2 Modulation depth decreases with frequency increasing

2.2 MTF与PSF、LSF、ESF的关系

假设图像探测器对一个真实的点光源是理想的连续采样,如图3(a)所示,点扩展函数(PSF)即为探测器成像得到的二维图像分布函数 $f_{\text{image}}(x,y)$,表示为 $F_{\text{PS}}(x,y)$

$$F_{\text{PS}}(x,y)\equiv f_{\text{image}}(x,y)\,. \tag{3}$$

在上述同样理想的情况下,用一个线光源来替代点光源,如图3(b)所示,线扩散函数(LSF)即为探测器成像得到的二维图像分布函数 $f_{\text{image}}(x,y)$,它是一维空间变量的函数,表示为 $F_{\text{LS}}(x)$

$$F_{\text{LS}}(x)\equiv f_{\text{image}}(x,y)\,. \tag{4}$$

ESF即边缘扩散函数。在理想的情况下,用刃边图像作为靶标,如图3(c)所示,那么ESF就是探测器成像得到的二维图像分布函数 $f_{\text{image}}(x,y)$,表示为 $F_{\text{ES}}(x)$

$$F_{\text{ES}}(x)\equiv f_{\text{image}}(x,y)\,. \tag{5}$$

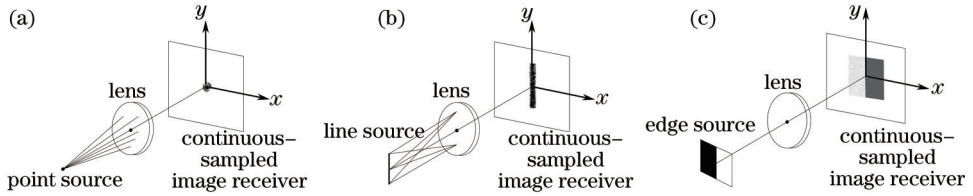


图3 扩散函数测量装置。(a) 点扩展函数; (b) 线扩展函数; (c) 边缘扩散函数

Fig.3 Spread function measurement configuration. (a) PSF; (b) LSF; (c) ESF

MTF与PSF、LSF、ESF之间的关系为[13]

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left[F_{\text{ES}}(x)\right]=F_{\text{LS}}(x). \tag{6}$$

$$F_{\text{MT}}(\xi,\eta)=\left|\mathscr{F}\mathscr{F}\left[F_{\text{PS}}(x,y)\right]\right|. \tag{7}$$

$$F_{\text{MT}}(\xi,0)=\left|\mathscr{F}\left[F_{\text{LS}}(x)\right]\right|. \tag{8}$$

求解ESF是刃边法测量MTF的重要步骤,由(6)~(8)式可以看出,对ESF求一阶微分得到LSF,对LSF做快速傅里叶变换(FFT)后归一化就可以计算出MTF,如图4所示。因此,准确的拟合ESF是获得真实MTF曲线的关键。

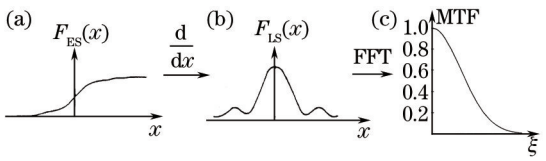


图4 ESF、LSF和MTF的计算关系

Fig.4 Calculate relationship of ESF, LSF and MTF

2.3 ISO 12233倾斜刃边法

图5(a)为一个倾斜刃边靶标,图5(b)为图像探测器对靶标的成像。求解ESF的前提是准确的从成像图像中估计出刃边的位置和刃边角度[14]。

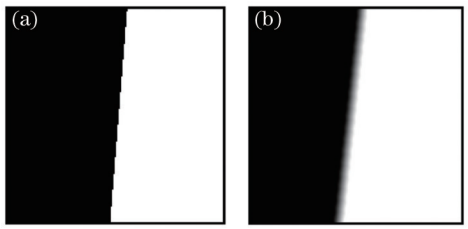


图5 (a) 倾斜刃边靶标; (b) 倾斜刃边靶标成像

Fig.5 (a) Slanted-edge target; (b) slanted-edge target imaging

ISO 12233倾斜刃边法是对图像中的每一行数据求一维导数,找出每一行导数中最大值所对应的点,用这些点拟合一条直线,即倾斜刃边函数[15]。将图像中所有的像素点沿倾斜刃边方向投影到水平轴上,水平轴的采样间隔为0.25 pixel,如图6所示,对每个采样间隔中的像元合并求灰度平均值,作为纵轴的取值,并以水平轴为横轴绘制出边缘扩散曲线,最后通过曲线拟合获得ESF[15]。

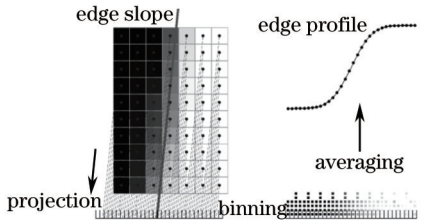


图6 图像投影,合并,平均,拟合ESF的过程

Fig.6 Process of projection, binning, and averaging before forming ESF

电荷耦合器件(CCD)相机在采集图像的时候,难免会引入一些噪声,ISO 12233倾斜刃边法的抗噪声干扰能力较差,当噪声较大时,对倾斜刃边角度和ESF的估计会有较大的误差[16]。

3 改进的MTF测量方法

为了消除噪声对倾斜刃边角度估计的影响,提出了一种基于正态分布模拟和中值点查寻的倾斜刃边法。

3.1 正态分布模拟倾斜刃边图像

引入一个二维函数$f_{\mathrm{fit}}(x,y)$来模拟倾斜刃边图像的数据[15]。

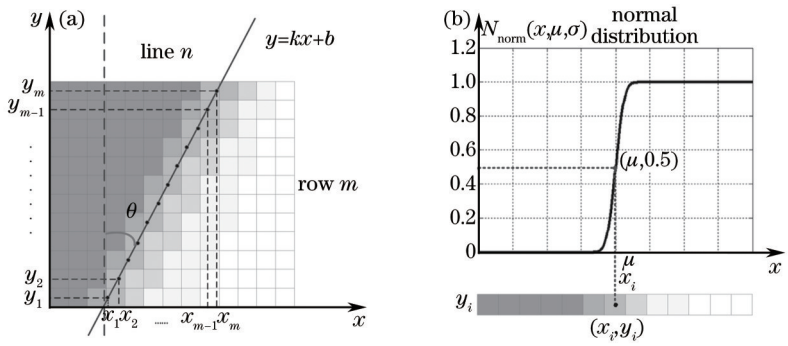


图7 (a) 倾斜刃边图像和倾斜刃边函数; (b) 每行像元灰度值与正态分布函数的关系

Fig.7 (a) Slanted-edge image and function; (b) relationship of normal distribution function and grey level of pixels of each row

图7(a)为倾斜角度为θ的刃边图像,用函数$f_{\mathrm{image}}(x,y)$表示,图像尺寸为$m\times n$,理想的倾斜刃边直线如图7(a)实线所示,函数方程为$y=kx+b$,倾斜刃边角度$\theta=\arctan(1/k)$。图像第i行像元中心所在直线与倾斜刃边直线相交于点(x_i,y_i),因此m行图像与倾斜刃边直线相交于m个点,坐标分别为(x_1,y_1), (x_2,y_2),... (x_{m-1},y_{m-1}) ,(x_m,y_m),如图7(a)圆点所示,因此可列方程

$$x_i=(y_i-b)/k,\ i=1,2\cdots m-1,m. \tag{9}$$

对于图7(a)的刃边图像,每一行图像数据都符合$X\sim N(\mu,\sigma)$的正态分布,正态分布函数记为$N_{\mathrm{norm}}(x,\mu,\sigma)$,图7(b)所示,因此可以用一个一维函数$f_{\mathrm{fit}}(x,y_i)$来模拟每一行图像的数据

$$f_{\mathrm{fit}}(x,y_i)=(f_{\mathrm{H}}-f_{\mathrm{L}})N_{\mathrm{norm}}(x,\mu,\sigma)+f_{\mathrm{L}},\ i=1,2\cdots m-1,m\ , \tag{10}$$

式中 f_{H} 为图像中典型亮区域的平均灰度值，f_{L} 为典型暗区域的平均灰度值。由图7(b)和(9)式可知，$N_{\mathrm{norm}}(x,\mu,\sigma)$ 的中点 $(\mu,0.5)$ 对应于倾斜刃边直线与每行图像的交点 (x_i,y_i)，因此(10)式中 $\mu=x_i=\frac{1}{k}y_i-\frac{b}{k}$。将(10)式拓展到二维空间，就得到了模拟倾斜刃边图像数据的二维函数 $f_{\mathrm{fit}}(x,y)$ [14]

$$f_{\mathrm{fit}}(x,y)=(f_{\mathrm{H}}-f_{\mathrm{L}})N_{\mathrm{norm}}(x,\mu,\sigma)+f_{\mathrm{L}}\ , \tag{11}$$

式中 $\mu=\frac{1}{k}y-\frac{b}{k}$。(11)式适用于图7(a)倾斜刃边图像，若倾斜刃边图像左面的灰度值高于右面的灰度值，则 $N_{norm}(x,\mu,\sigma)$ 中 x 取为 $-x$。

当 $f_{\mathrm{fit}}(x,y)$ 与 $f_{\mathrm{image}}(x,y)$ 的灰度值方差 Δf 最小时，正态分布模拟图像与实际图像的相似度最高，Δf 的定义为

$$\Delta f=\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{n}\sqrt{f_{\mathrm{fit}}(x,y)^2-f_{\mathrm{image}}(x,y)^2}\ , \tag{12}$$

通过

$$\arg\min_{k,b,\sigma}\|\Delta f\|\ , \tag{13}$$

进行参量 k、b、σ 最优化估计，σ 决定了 $f_{\mathrm{fit}}(x,y)$ 的刃边扩散程度，k、b 决定了 $f_{\mathrm{fit}}(x,y)$ 中倾斜刃边的角度和位置。将求解的 k、b、σ 的最优估计值，代入(11)式求得最优的正态分布模拟图像 $f_{\mathrm{fit}}(x,y)$ [15]。

3.2 基于中值点查寻的刃边角度估计

用正态分布模拟倾斜刃边图像时，除了最优的 $f_{\mathrm{fit}}(x,y)$ 函数，还获得了 k、b、σ 的最优值 k_{fit}、b_{fit}、σ_{fit}，理论上 k_{fit} 就是求得的最佳斜率。但是由于探测器像元尺寸不是无限小，由(11)式可知，y 的取值为1，2，3…，因此 $N_{\mathrm{norm}}(x,\mu,\sigma)$ 的取值并不连续，这就会给 $f_{\mathrm{fit}}(x,y)$ 的取值带来影响，所以 k_{fit}、b_{fit} 的最优估计也会出现偏差，通过大量实验发现 k_{fit} 并不是最理想的刃边斜率[17]。

由3.1节可知，正态分布模拟图像与实际图像相似度很高，倾斜刃边的倾斜度与实际图像基本一致，所以在此基础上，用中值点查寻法对正态分布模拟图像 $f_{\mathrm{fit}}(x,y)$ 进行计算，求出最佳斜率 k_{opt}

1）计算模拟图像典型亮区域的灰度均值 f_{H} 和典型暗区域的灰度均值 f_{L}，图像的灰度中值 $f_{\mathrm{m}}=(f_{\mathrm{H}}+f_{\mathrm{L}})/2$。

2）找出模拟图像 $f_{\mathrm{fit}}(x,y)$ 每一行数据中与灰度中值 f_{m} 差值最小的像元位置。

3）以这些像元位置为横轴，对应的行数为纵轴拟合成一条直线，该直线的斜率即最佳斜率 k_{opt}，最佳刃边角度 $\theta_{\mathrm{opt}}=1/\arctan(k_{\mathrm{opt}})$。

3.3 计算ESF和MTF

求出最佳斜率 k_{opt} 和最佳刃边角度 θ_{opt} 后，利用ISO 12233方法绘制出实际图像的边缘扩散曲线，然后对曲线拟合求ESF。采用费米函数拟合来获得ESF，其函数模型表示为

$$F_{\mathrm{ES}}(x)=\sum_{i=1}^{3}\frac{a_i}{\exp(\frac{x-b_i}{c_i})+1}+d. \tag{14}$$

实验表明，使用3个费米函数的线性组合就能获得足够的拟合精度，并且拟合结果稳定，受误差点影响小。求出ESF后根据2.2节(6)~(8)式可求出MTF。

4 噪声对刃边角度估计的影响分析

为了验证本文算法的准确度，分别用ISO 12233、文献[15]和本文方法对三幅仿真图进行倾斜刃边角度估计，并将结果进行对比。

图8的三幅图是由倾斜度为4.72°的理想倾斜刃边图像与点扩展函数卷积得到的退化图像。

正态分布模拟的倾斜刃边图像与实际图像的对比如图9所示，从图9可以看出，模拟图像与实际图像有着良好的相似度。当实际图像存在较大噪声时，该方法并未受到干扰，模拟图像与实际图像倾斜刃边的角

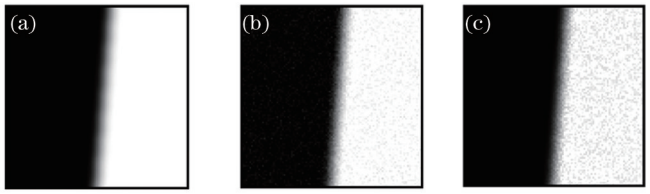


图 8 4.72°的倾斜刃边图像。(a) 无噪声; (b) 高斯噪声; (c) 随机噪声

Fig.8 4.72° Slanted-edge image. (a) No noise; (b)Gaussian noise; (c) random noise

度基本一致,如图 9(b)和图 9(c)所示。文献[15]利用模拟图像函数求出倾斜刃边角度,未考虑步长的影响,而利用中值点查寻法对模拟图像进行倾斜刃边角度估计。用本文方法、文献[15]和 ISO 12233 对图 8 三幅图进行倾斜刃边角度估计的结果如表 1 所示, θ 为倾斜刃边角度实际值, θ' 为倾斜刃边角度测量值, δ 为刃边角度的估计误差,定义为

$$\delta = (\Delta\theta/\theta) \times 100\% = (|\theta - \theta'|/\theta) \times 100\%, \tag{15}$$

实验数据显示,用本文方法计算的倾斜刃边角度误差较小,在实际图像噪声较大的时,本文方法明显优于 ISO 12233 和文献[15],倾斜刃边角度的估计更接近实际值。

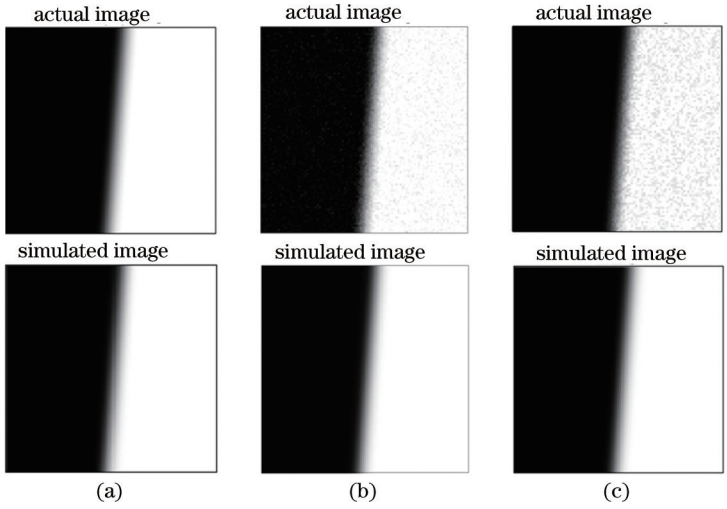


图 9 模拟图像与实际图像对比。(a) 无噪声; (b) 高斯噪声; (c) 随机噪声

Fig.9 Contrast of simulated image and actual image. (a) No noise; (b) Gaussian noise; (c) random noise

表 1 不同方法对图像倾斜刃边角度估计值和估计误差

Table 1 Edge angle and error of angle of image under different methods

	No noise		Gaussian noise		Random noise	
	θ' /(°)	δ /%	θ' /(°)	δ /%	θ' /(°)	δ /%
ISO 12233	4.7505	0.646	4.7683	1.024	4.8138	1.987
Ref.[15]	4.7482	0.597	4.7584	0.814	4.6672	1.119
Proposed method	4.7463	0.557	4.7529	0.696	4.6910	0.604

为了进一步验证算法的准确性和稳定性,用 ISO 12233、文献[15]和本文方法分别对多种角度的无噪声和噪声图像进行边缘角度估计,刃边角度的估计误差如表 2 所示。在无噪声的条件下,三种方法都能够精确的求出倾斜刃边的角度。在含噪声的条件下,ISO 12233 计算的角度误差显著增加,甚至达到了 2%,文献[15]的计算误差相对较小,在 0.688%~0.913%之间,而本文方法的估计误差均小于 0.696%。通过大量的实验发现,由于噪声的分布很随机,用 ISO 12233 方法和文献[15]的方法会造成更大的误差。本文算法的抗噪声干扰能力很强,在高斯噪声和随机噪声的条件下,计算误差始终保持在理想的范围内。

表2 多种角度下无噪声、高斯噪声和随机噪声的图像边缘角度的估计误差

Table 2 Error of edge angle of image with no noise, Gaussian noise and random noise at different angles

θ /(°)	δ /%								
	No noise			Gaussian noise			Random noise		
	ISO 12233	Ref.[15]	Proposed method	ISO 12233	Ref.[15]	Proposed method	ISO 12233	Ref.[15]	Proposed method
2.86	0.456	0.367	0.334	1.064	0.756	0.526	1.542	0.913	0.666
3.00	0.421	0.458	0.446	0.975	0.845	0.539	1.206	0.954	0.543
4.15	0.599	0.567	0.535	1.035	0.772	0.656	1.242	0.845	0.602
4.72	0.646	0.604	0.557	1.024	0.871	0.696	1.987	0.687	0.604
5.00	0.482	0.435	0.419	1.956	0.898	0.401	2.032	0.812	0.554
5.71	0.342	0.457	0.442	2.035	0.718	0.597	1.956	0.645	0.461
8.53	0.376	0.346	0.316	1.913	0.824	0.624	1.064	0.797	0.424
14.04	0.356	0.349	0.312	1.854	0.672	0.533	1.943	0.688	0.401

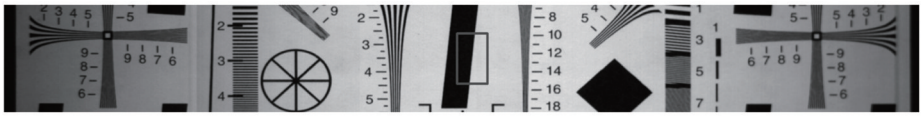


图10 实验图像

Fig.10 Experimental image

5 实验CCD相机MTF测量

为了验证本文算法的准确性及稳定性，用一部航天级时间延迟积分(TDICCD)实验相机进行实验验证。航天级TDICCD实验相机的像元尺寸为8.95 μm×8.95 μm，采样频率满足MTF测量的成像采样需求，对MTF测量结果影响可以忽略。相机已通过辐射标定实验获得了相机内部的非均匀性参数，并通过电子学方式做了像元级的非均匀性校正，因此在实验测量MTF时，只需考虑光源的非均匀性对MTF测量带来的影响。实验测量MTF所用靶标为ISO 12233分辨率测试卡，靶标光源为发光二极管(LED)，该光源的均匀性经过检测，基本满足MTF测量的需求，但是受实验环境和电源稳定性的影响，靶标光源可能会出现非均匀现象，这种现象会给成像引入随机噪声，通过第4节的讨论可知，本文方法可以有效地抑制随机噪声对MTF测量的影响，因此实验中无需考虑光源的非均匀性给测量结果带来的影响。

航天级TDICCD实验相机的行周期为71.4 μs，行频率为14kHz，该实验相机经过检测中心测量得到相机的MTF曲线如图11(a)所示，奈奎斯特频率下的MTF值为0.177。图10为航天级TDICCD相机拍摄的靶标图像，选取图10中方框区域内的倾斜刃边图像作为测试图像，如图11(b)所示，由ISO 12233标准可知，该倾斜刃边的倾斜角度为5.7°，但是由于靶标运动频率大于14kHz，导致图像纵向压缩，根据图中的圆形判断出靶标运动频率为14 kHz×110.46%，因此方框区域的倾斜刃边角度θ=arctan(tan 5.7×110.46%)=6.2917°。

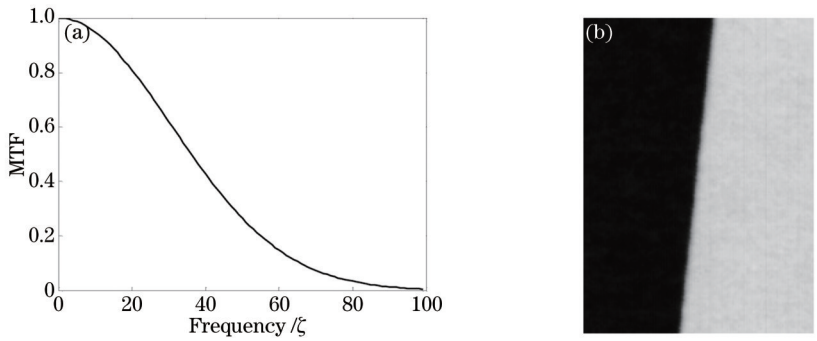


图11 (a) 实际MTF曲线; (b) 倾斜刃边图像

Fig.11 (a)Actual MTF curve; (b) slanted-edge image

分别用ISO 12233、文献[15]和本文算法对实验图像进行刃边角度估计，结果如表3所示，图12为实际图

像与正态分布模拟图像的对比。由表3和图12可以看出，由正态分布模拟的图像与实际图像相似度较好，由于实验图像存在噪声，ISO 12233计算的误差较大，文献[15]的计算误差较ISO 12233有所下降，本文方法测量的角度更接近实际值，误差只有0.764%。

表3 实验图像的角度测量结果

Table 3 Angle measurement of the experimental image

	ISO 12233	Ref.[15]	Proposed method
θ' /(°)	6.1627	6.2212	6.2436
δ /%	2.05	1.121	0.764

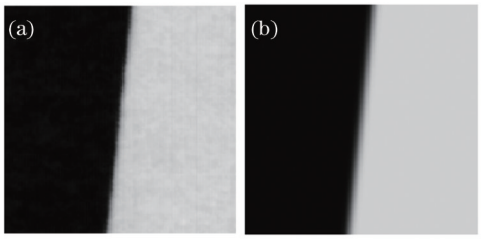


图12 (a) 实际图像; (b) 正态分布模拟的图像

Fig.12 (a) Actual image; (b) simulated image of normal distribution

图13是分别用ISO 12233、文献[15]和本文方法测量的实验相机的MTF曲线与实际MTF曲线对比。从图13可以看出，由本文算法测量的MTF曲线更接近实际的MTF曲线。三种方法测量的MTF值与实际MTF值之间的误差平均值 E_{mean} 、误差均方根 E_{var} 和奈奎斯特频率下的MTF值 $F_{\mathrm{MT,Nyquist}}$ 如表4所示，与ISO 12233和文献[15]相比，本文算法的测量误差较低，测得的奈奎斯特频率下的MTF值更准确，验证了本文算法的有效性。通过实验数据可以看出，本文算法有效地减小了图像噪声对测量结果的干扰，在倾斜刃边角度估计和MTF测量中，测量结果比ISO 12233和文献[15]的测量结果更准确。

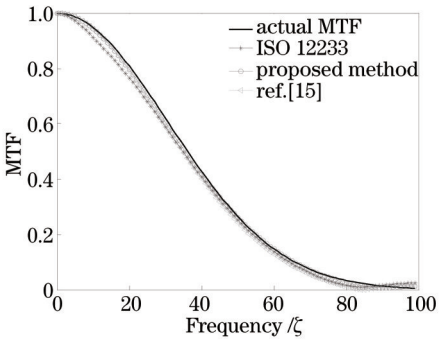


图13 调制传递函数曲线

Fig.13 Curves of modulation transfer function

表4 MTF测量值与实际值之间的误差平均值、误差均方根和奈奎斯特频率下的MTF值

Table 4 E_{mean} 、E_{var} 、$F_{\mathrm{MT,Nyquist}}$ of the experimental image

	E_{mean}	E_{var}	$F_{\mathrm{MT,Nyquist}}$
ISO 12233	0.0175	0.0107	0.168
Ref.[15]	0.0112	0.0083	0.171
Proposed method	0.0098	0.0055	0.180

6 结 论

MTF的测量有很多种方法，点光源和线光源法对光源要求很高，难以实现，某些专业测量MTF的装置操作复杂且成本昂贵。倾斜刃边法是测量MTF最简单且比较准确的方法，对光源要求不高，容易实现，成为测

量MTF的首选方法。本文算法解决了传统倾斜刃边法抗干扰能力差的缺点,高精度的模拟了实际图像的倾斜刃边分布情况,文献[15]忽略了计算步长对倾斜刃边角度估计产生的影响,而本文方法弥补了这一缺点,通过中值点查寻法对模拟图像进行估计,提高了倾斜刃边角度的测量精度。由实验结果可以看出,由本文算法测量的倾斜刃边角度和MTF误差较小,准确度均较ISO 12233方法合文献[15]的方法有所提高,并且该算法完全不受图像噪声的影响,在MTF测量精度提升的情况下保证了算法的稳定性。

参 考 文 献

1 Liu Haiqiu, Xu Shuyan, Wang Dong, *et al*.. Space camera image motion measurement based on images from time delayed integration sensors overlapped area[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0212001.
刘海秋, 徐抒岩, 王 栋, 等. 基于空间相机时间延迟积分传感器拼接区图像的像移测量[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0212001.

2 Zhu Hongyin. Research on Imaging Uniformity and Real-Time Automatic Exposure of Remote Sensing Camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2012.
朱宏殷. 星上成像均匀性及实时自动调光的研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.

3 Xie Bing, Jiao Binliang. The PSF estimation method and image restoration algorithm based on image-motion analysis of spaceborne TDICCD camera[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(3): 936-940.
谢 冰, 焦斌亮. 基于航天TDICCD相机像移分析的PSF估计及图像复原算法研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 936-940.

4 Li Tiecheng. Research on Mosulation Transfer Function Calculation and Remote Sensing Image Restoration Based on Slanted-Edge Method[D]. Hangzhou: Zhejing University, 2011.
李铁成. 基于倾斜刃边法的遥感图像调制传递函数计算及图像复原技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.

5 Liao Jingyu, Gao Xiaodong, Liang Wei. Dynamic MTF analysis and research for aerial camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(5): 679-683.
廖靖宇, 高晓东, 梁 伟. 航空相机动态调制传递函数分析与研究[J]. 光子学报, 2011, 40(5): 679-683.

6 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun, *et al*.. Modulation transfer function 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.

7 Zhang Xiaolin, Du Guohao, Deng Biao, *et al*.. High precision measurement of modulation transfer function for X-ray CCD with knife-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1680-1687.
张晓琳, 杜国浩, 邓 彪, 等. 刀口法高精度测量X射线CCD调制传递函数研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1680-1687.

8 Xu Baoshu, Shi Zelin, Feng Bin. Modulation transfer function measurement method of electro-optiacl imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1111004.
徐保树, 史泽林, 冯 斌. 一种光电成像系统调制传递函数的测量方法[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 111004.

9 Viallefont-Robinet F, Léger D. Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement[J]. Opt Express, 2010, 18(4): 3531-3545.

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研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1022001.

11 Zhao Huijie, Qin Baolong, Jia Guorui. On-orbit detection for modulation transfer function of hyperspectral remote sensing system[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1235-1243.
赵慧洁, 秦宝龙, 贾国瑞. 高光谱遥感系统调制传递函数的在轨测试[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(6): 1235-1243.

12 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.

13 Li Yapeng, He Bin. Modulation transfer function assessment of spaceborne linear charge-coupled device subpixel imaging[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 121102.
李亚鹏, 何 斌. 星载线阵电荷耦合器件错位成像的调制传递函数评估[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 121102.

14 International Oraganization for Standardization. ISO 12233: 2000. Photography- Electronic Still- Picture Cameras- Resolution Measurements[S]. 2000.

15 Masaoka K, Yamashita T, Nishida Yu, *et al*.. Modified slanted-edge method and multidirectional modulation transfer function estimation[J]. Opt Express, 2014, 22(5): 6040-6046.

16 Yuan Gaobin, Li Binqiao, Xu Jiangtao, *et al*.. Research of MTF velocity mismatch model for time delay integration CMOS area image sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0104001.

袁高斌, 李斌桥, 徐江涛, 等. 时间延迟积分面阵CMOS图像传感器MTF速度失配模型研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0104001.

17 Da, Zhou Huaide, Long Kehui, *et al*.. Screening and testing method for area CCD[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0708001.

余 达, 周怀得, 龙科慧, 等. 一种面阵CCD的筛选测试方法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0708001.

栏目编辑: 苏 岑