

文章编号: 0253-2239(2010)06-1680-08

# 刀口法高精度测量 X 射线 CCD 调制传递函数研究

张晓琳 杜国浩 邓彪 谢红兰 薛艳玲 陈灿 任玉琦 周光照 肖体乔

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

**摘要** 刀口法是测量 X 射线探测器调制传递函数(MTF)的主要方法之一,但影响测量精度的因素很多,正确的数据处理是提高测量精度的关键。提出了一种组合数据处理方法,系统地降低了测量带来的误差,从而实现了高分辨 X 射线 CCD 调制传递函数的测量。实验前仿真调制传递函数,预测曲线走势和噪声干扰。利用自适应平均行算法、回型窗法和哈夫变换得到刀口倾斜角来纠正 MTF 曲线。提出了局部曲线分析法,以定量分析曲线波动情况,消除前人视觉判断的主观误差。通过上述算法得到的 MTF 曲线的均方差仅为 0.011, Nyquist 频率误差为 2.52%。

**关键词** 光学测量; X 射线 CCD; 调制传递函数测量; 刀口法

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1680

## High Precision Measurement of Modulation Transfer Function for X-Ray CCD with Knife-Edge Method

Zhang Xiaolin Du Guohao Deng Bao Xie Honglan Xue Yanling

Chen Can Ren Yuqi Zhou Guangzhao Xiao Tiqiao

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Knife-edge method is one of the main methods to obtain the modulation transfer function (MTF) of X-ray detectors, while data processing is critical to the accuracy. A series of data processing methods is presented, which can improve the measurement accuracy of MTF for a high-resolution X-ray CCD. Before experiments, MTF simulation is employed to predict the curve trend and noise level. Subsection-analysis algorithm is used to analyze the curve fluctuation in order to eliminate the subjective errors. MTF is recorrected by the oblique angle of the knife edge, which is gotten by using self-adaptive algorithm, clip-window algorithm, and Hough transform. After all the procedures, the mean square deviation of 0.011 for the MTF is achieved, while the Nyquist frequency error is 2.52%.

**Key words** optical measurement; X-ray CCD; modulation transfer function measurement; knife-edge method

## 1 引言

调制传递函数(MTF)是光学传递函数(OTF)的模数,反映了光学系统对现实世界的再现情况,能科学、客观地评价光学系统成像能力<sup>[1~4]</sup>。测量 X 射线成像系统调制传递函数的方法主要有两种<sup>[5~6]</sup>: 1) 通过系统的线扩展函数(LSF)计算得到, 2) 通过方波响应或矩形波测试卡测量计算。LSF 根据所用测试样品的不同又可分为狭缝法、刀口法

和栅条法,其中前两种方法是国际放射学界公认的较好方法。尤其是刀口法,已被国际电工学委员会(IEC)定为测量 MTF 的标准方法。1997 年 Samei 等<sup>[7]</sup>利用锐利的刀口装置成像,将铅箔置于两块很薄的丙烯酸板中间,并将其以一定的倾斜角度放置于探测器表面成像,所测 MTF 值稍低。2000 年 Granfors 等<sup>[8]</sup>采用同样的方法,并在测量装置上有所改进,通过加入了一块钨板来消除入射 X 射线的

收稿日期: 2009-07-03; 收到修改稿日期: 2009-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(10505028, 10805071, 10705020)和上海市基础研究重点项目(03107JC14062, 8JC1411900)资助课题。

作者简介: 张晓琳(1984—),女,硕士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: zhangxiaolin@sinap.ac.cn

导师简介: 肖体乔(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事 X 射线光学、成像光学及光学检测方面的研究。

E-mail: tqxiao@sinap.ac.cn

二次散射对 MTF 的影响,但是精度并没有得到明显提高。2004 年日本 Yamazaki 等<sup>[9]</sup>对刀口法进行了突破性的改进,将钨片置于丙烯酸做成的校准支撑体作为入口,能够同时获得装置四边的边缘扩展函数,进而得到水平和垂直两个方向上的 MTF,并对齐校正。该方法精度很高,并且同时还考虑到了剂量依赖性和实验的可重复性,但从数据处理的角度上,没有给出降噪标准和曲线降噪效果的定量分析。从实验操作的角度,该方法过程复杂、对测试样品的要求也较高,同时由于同步辐射的光源比较狭窄,在满足精度要求的条件下同时获得四边像极难实现。

本文提出一种刀口法测量 MTF 的方法,对测量结果采用了一系列的组合数据处理方法,既可以满足测量精度要求,又能简化实验操作、降低实验样品制作难度,同时还可实现每一步中间结果的定量分析,从而减少主观判断带来的误差。

## 2 测量原理

MTF 是根据正弦波光栅来定义的,对于一组正弦的明暗相间的条纹,其明暗程度在空间某一方向上周期性地变化,最亮处亮度记为  $I_{\max}$ ,最暗处亮度记为  $I_{\min}$ ,则调制度定义为<sup>[10]</sup>

$$M = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}), \quad (1)$$

最理想的条纹,或最“锐”的条纹,其调制度为 1。然后让这组条纹(调制度记为  $M_{\text{in}}$ )通过一个镜头成像,在像平面上得到再现的新条纹(调制度  $M_{\text{out}}$ ),则这一镜头的是<sup>[7]</sup>

$$M' = \frac{M_{\text{out}}}{M_{\text{in}}}. \quad (2)$$

实验中利用边缘锐利的铅等金属模块成像,刀口目标函数可以用刀口函数或者阶跃函数  $s(x)$  表示为<sup>[6,10,11]</sup>

$$f(x, y) = s(x)I(y), \quad (3)$$

即刀口扩展函数  $E(x)$  是点扩展函数  $P(x, y)$  与单位阶跃函数的卷积<sup>[6,11]</sup>

$$g(x, y) = E(x) = P(x, y) * s(x)I(y), \quad (4)$$

$$\frac{d}{dx}\{E(x)\} = \frac{d}{dx}\int L(x')dx' = L(x), \quad (5)$$

也就是说通过对刀口扩展函数微分,就可以获得这个方向的线扩展函数,进而获得这个方向的 OTF,而 MTF 实际上是 OTF 的模数。图 1 是采用刀口像分析获得被测系统 MTF 的原理示意图。通过对刀口成像得到边缘扩展函数(ESF);差分便可得到线扩展函数(LSF);对线扩展函数做傅里叶变换得到 MTF。

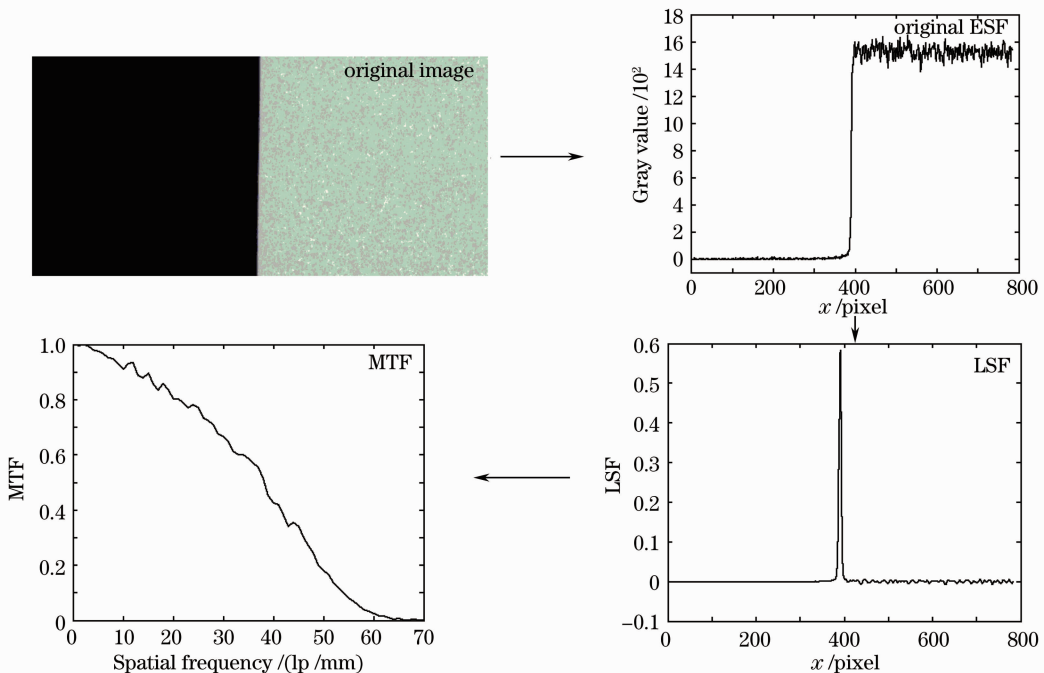


图 1 刀口像分析获得被测系统 MTF 的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of obtaining MTF by using knife-edge method

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 实验装置

同步辐射光具有高准直、高纯净和高耀度的特点。利用上海光源得天独厚的实验平台,不仅可以大大简化实验设备,还能够获得高可信度的结果。实验在 X 射线成像及生物医学应用光束线站(BLW-13)上进行,对 HAMAMATSU 公司的 C9300-124CCD 的 MTF 数进行了测量,采用的样品是厚度为 1 mm 的铅片。要求铅片的刀口必须尽可能光滑,而对样品的尺寸要求并不十分严格。将样品直接固定在 CCD-X 射线探测器上,关闭实验棚屋、调节束流参数。具体

实验的参数束流为 49.080 mA、寿命为 55.415 h、扭摆器磁隙为 17 mm 和能量为 35 keV。参数设置好后,如图 2 所示,将荧光靶放下,通过 CCD 将荧光靶光强信号传到棚屋外的观察屏上,调节单色器晶体的位置,直到屏幕上光强最亮为止,此时入射光线已经满足布拉格角,也就是达到了实验的最佳状态。提起荧光靶,对实验样品成像,曝光 300 ms,得到图像后拆除样品,照一张背景像,同样曝光 300 ms,两张图像得到后做减背景处理。这样可以消除 CCD 的原背景并减少暗电流的影响,得到如图 3 的刀口图像。如果不对噪声做任何处理,所得到的 MTF 将如图 4 所示。

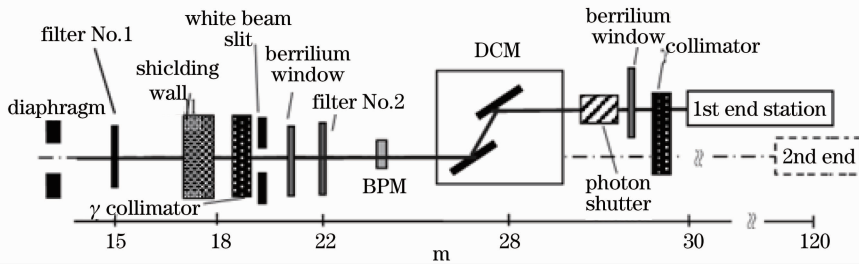


图 2 X 射线成像及生物医学应用光束线布局示意图

Fig. 2 Schematic layout of X-ray imaging and biomedical application beam line BLW-13



图 3 刀口像

Fig. 3 Knife-edge image

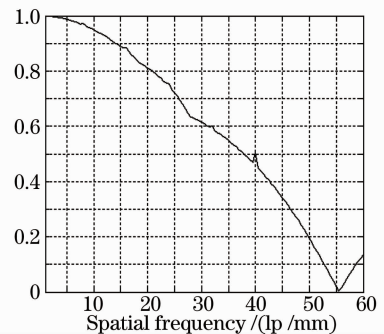


图 5 理想的 MTF 曲线

Fig. 5 Ideal MTF curve

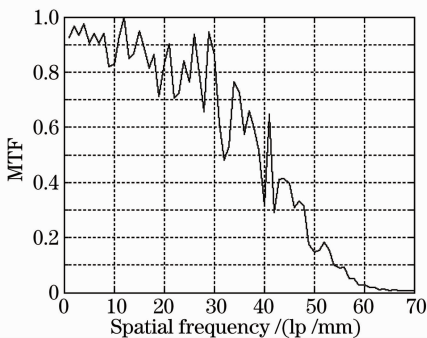


图 4 未降噪的 MTF 曲线

Fig. 4 Original MTF curve

而根据测量原理 C9300-124CCD 的理想 MTF 曲线应如图 5 所示。

图 4,图 5 比较可知在同步辐射环境中白斑噪声的影响是很大的,白斑噪声成为 MTF 测不准的

严重因素。

#### 3.2 数据处理和分析

为消除噪声干扰、提高测量精度,分别对 ESF, LSF 和 MTF 进行多重降噪处理。

##### 3.2.1 ESF 降噪算法

获得的原始刀口像分布着大量的白斑噪声和其它噪声,CCD 的白斑噪声呈颗粒状,大小不等,其灰度值比周围像素的灰度值大得多,如图 6 所示。考虑到整幅图像中白斑噪声像素个数远小于有用信息像素个数以及刀口像特有的特征:刀口图像在平行于阶跃边的每一条线上的像素值应相等,所以采用阈值法初步消除白斑噪声<sup>[12]</sup>。图像的灰度值

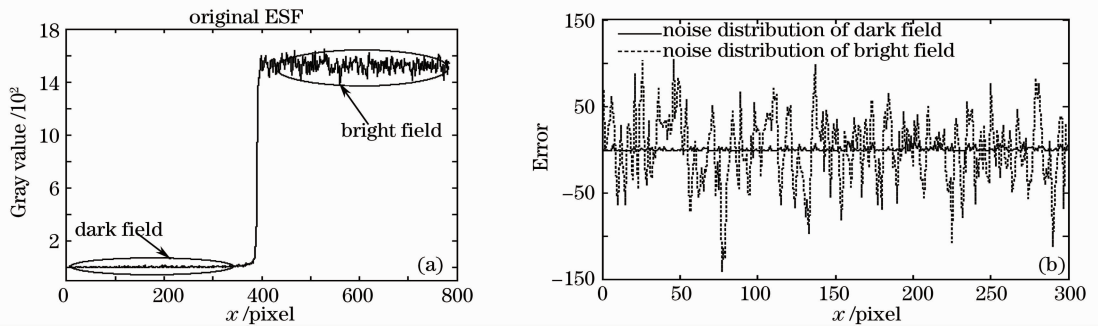


图 6 原始(a)ESF 及其(b)噪声分布

Fig. 6 Original (a) ESF and (b) noise distribution

为  $f(x, y)$ , 每一列的像素灰度值应基本相等, 对每一列数据求平均, 得到数值  $t(y)$ <sup>[12,13]</sup> 为

$$t(y) = \frac{1}{M} \sum_{x=1}^M f(x, y), \quad (6)$$

用求出的  $t(y)$  作为阈值, 对每一行的每个数据进行检查, 凡是大于  $t(y)$  的数据用  $t(y)$  代替, 否则保留原来的数据。经过这样的处理后白斑噪声会有效消减, 但是噪声干扰还是很大的, 需要进一步降噪。一般的滤波方法在降噪的同时会使图像变得模糊。维纳滤波是一种经典的自适应滤波的方法, 原理是使复原图像与原图像之间的均方误差最小<sup>[14]</sup>:

$$\min S = \min E\{e^2(x, y)\} = \min E\{[\hat{f}(x, y) - f(x, y)]^2\}, \quad (7)$$

式中  $S$  为均方差,  $\hat{f}(x, y)$  为复原原图像,  $f(x, y)$  为原始图像。这种滤波方法根据局部图像的差异来调整滤波器的参数。对局部差异较大的地方进行小的

平滑操作, 对局部差异小的地方进行大的平滑操作, 这样可以保留图像的边缘部分。维纳滤波后降噪空间仍旧很大, 利用中值滤波继续平滑。中值滤波可以去除快变的孤立噪声而保留一个信号的阶梯和跳变。处理时, 采用  $3 \times 3$  的模板在整幅图像中漫游。处理后图像的光滑度大大地改善, 噪声幅值也大幅度减小。下面是降噪前和降噪后的图像比较, 降噪前如图 6 所示, 降噪后如图 7 所示。

为了对降噪效果分析精确起见, 提出局部曲线定量分析法。将整个图像如图 6(a), 分为明场区和暗场区, 如果将明暗场区各自的平均值作为 ESF 的标准值, 则可以得到它的噪声分布图如图 6(b)。从图 6, 图 7 可以看出图像的光滑度已经得到了大大改善, 噪声幅值也大幅度减小。表 1 给出定量的分析结果。

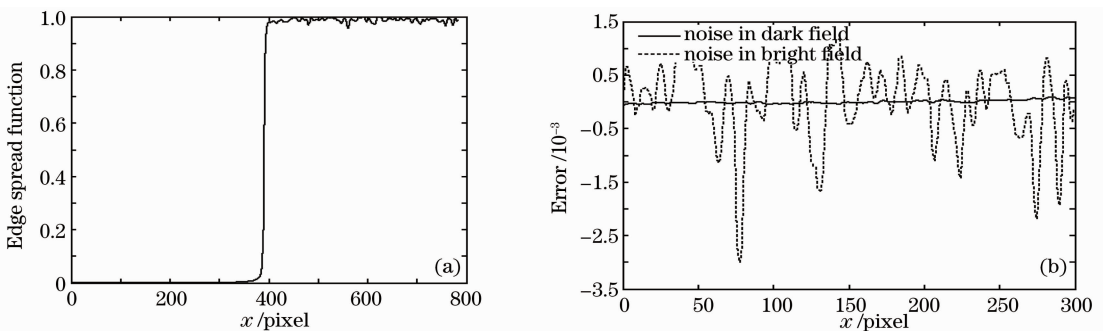


图 7 降噪后的(a)ESF 及其(b)噪声分布

Fig. 7 (a) ESF and (b) noise distribution after noise reduction

表 1 边缘扩展函数(ESF)各个降噪时期的噪声定量分析

Table 1 Quantitative analysis of noise in various periods

	Average error		Mean square deviation	
	Dark field	Bright field	Dark field	Bright field
Original image	1.9598	33.4846	2.6039	41.534
Threshold denoise	1.1949	21.4135	1.3161	27.183
Winer filter	0.1893	22.5376	0.2317	28.5056
Median filter	0.3770	8.8089	0.47538	11.681

从原始图像的数据上看,无论是平均误差还是均方差,明场区都明显大于暗场区。对于暗场区而言,因为材料厚度足以挡住所有的 X 射线,光源的影响可以忽略不计,那么引起其波动的主要原因是 CCD 暗电流及其自身参数,但影响并不大。而明场区受光源的影响比较大,而且是影响 MTF 测量的关键因素,因此在考虑降噪时应充分考虑明场区的降噪效果。这样的分析结果也刚好与之前的模拟结果相吻合。

看维纳滤波与中值滤波的数据,维纳滤波后暗场的降噪效果达到最优值,而中值滤波后明场的降噪效果远远好于维纳滤波。根据前面的分析结果,明场区受光源影响较大,是测试不准的关键部分,所以在降噪效果上应更多地考虑明场区的噪声情况。也就是说虽然维纳滤波使暗场达到最佳效果,但是中值滤波还是必需的,这样才能实现整体最优。

从整个图表上来看,几种降噪算法下来无论是明场区还是暗场区数据都有变好的趋势,特别是中值滤波的效果更为明显。但仅靠中值滤波并不能达到理想的结果。在刀边像的处理中,用多行平均的方法降噪是不可替代的。

假设叠加在每个像点上的噪声是不相关的加性噪声。令  $g(x)$  为刀口像中单列能量分布,  $n(x)$  为噪声,  $f(x)$  为实际刀口像的能量分布,可表示为<sup>[5,15]</sup>

$$g(x) = f(x) + n(x), \quad (8)$$

如果刀口与 CCD 完全对准,取  $M$  行刀口像叠加平均即可达到平滑噪声的目的:

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g_i(x) = f(x) + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n(x). \quad (9)$$

噪声随平均行数的增加呈线性减小,由于噪声是与信号无关的随机白噪声,多行平均可以减低噪声方差,且平均行数越多,对噪声的抑制作用越明显。但是,多行平均的算法使用上受到严格的限制,它要求光源绝对均匀、刀口与 CCD 精确对准,这在实际操作中是不可能实现的。所以先对 ESF 做归一化处理来减少光源不均匀的影响,并在允许误差范围内,采用自适应平均行数<sup>[5]</sup>算法。

处理结果如图 8 所示,最后得到的方差为:暗场为 0.3683;明场为 3.6469。与表 1 相比平滑程度有了质的飞跃。并且再加入其它滤波方法之后,图像都没有明显变好,即曲线大方差几乎没有变小。到此为止 ESF 处理结束,进入下一个阶段,求取 LSF。

### 3.2.2 LSF 求取与降噪算法

从刀口函数获得 LSF 的方法主要分为<sup>[11]</sup>1)由

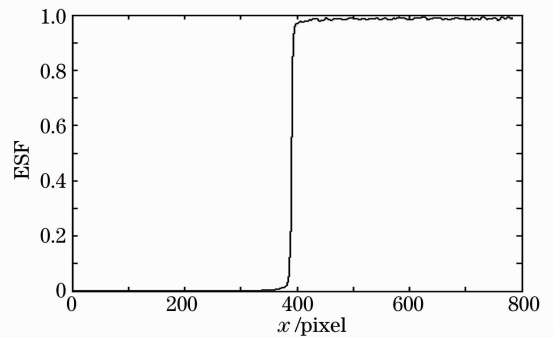


图 8 最终的 ESF

Fig. 8 Final ESF

离散 ESF 直接微分,或者在精度允许的范围内,进行差分运算;2)由微分滤波函数,在实现数字微分过程中获得滤除高频噪声的效果。典型的方法是用矩形波滤波器与 ESF 卷积获得 LSF:

$$\begin{cases} L(x) = \frac{1}{3} \sum_{i=-3}^3 E(x+i)H(x+i), \\ H(x) = [-1, -1, -1, 0, 0, 1, 1, 1], \end{cases} \quad (10)$$

选用第二种算法计算 LSF 曲线。对 ESF 的空域微分会增加噪声,因此需将曲线进行平滑处理,采用一次 5 点的平滑处理方法<sup>[16]</sup>,结果如图 9 所示。

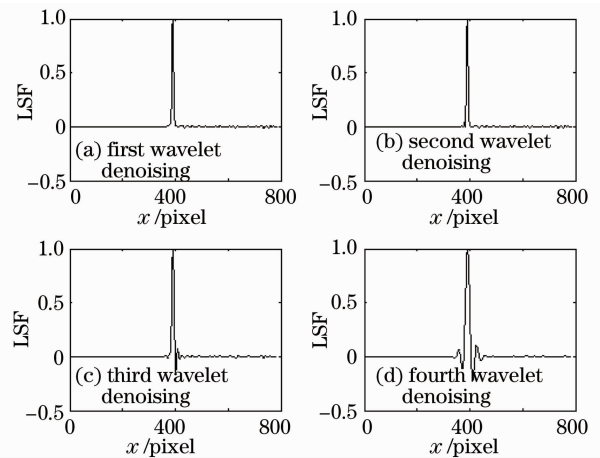


图 9 小波降噪结果

Fig. 9 Results of wavelet denoising

经过比较,二、三层降噪是比较理想的,一层降噪的降噪效果不好,四层降噪虽然可以达到去噪效果,但是原图形失真严重。小波降噪后的 LSF 曲线满足要求,可以进行傅里叶变换得到 MTF 曲线,如图 10 所示。

### 3.2.3 MTF 降噪算法

得到的 MTF 曲线还是会有噪声影响,为了将噪声尽可能地减少,采用回形窗法<sup>[11]</sup>消除基底噪声对低频数据的影响。算法如下:对于获得的 LSF,分别采用不同大小的窗口进行处理,计算出不同采样范围

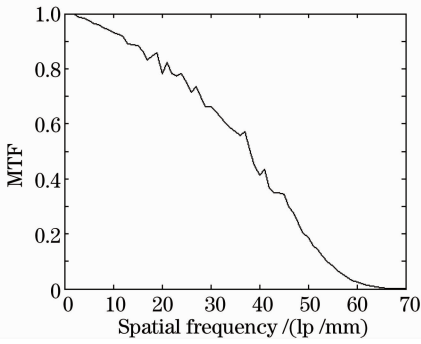


图 10 MTF 曲线

Fig. 10 MTF curve

下的 MTF 值,认为两个窗口未重叠的部分只包含噪声,这样就可以估计出噪声的频谱,对两个窗口处理中的任何一个进行噪声频谱修正,就可以得到抑制了噪声影响的 MTF 计算结果,如图 11 所示。

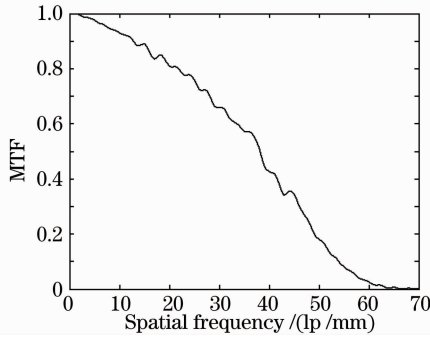


图 11 加回形窗的 MTF 曲线

Fig. 11 MTF curve processed by clip-window algorithm

为了查看回形窗的处理结果,将未加回形窗 MTF 曲线和经回形窗处理的 MTF 曲线分别与理想模拟曲线相比较,如图 12,13 所示。可以看出,经过回形窗处理的曲线变得更加光滑。

如图 14 所示,再将两个曲线与理想曲线做差查看其与理想 MTF 曲线的偏差情况。

表 2 为 MTF 测量效果量化分析。

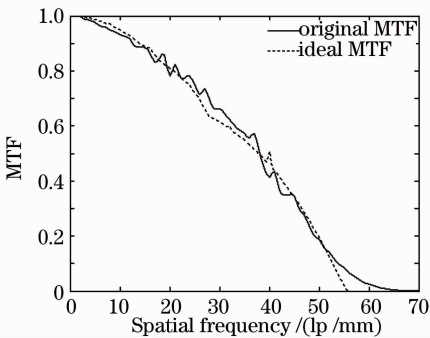


图 12 未经回形窗处理的 MTF 曲线与理想曲线的比较

Fig. 12 Comparison between original and ideal MTF

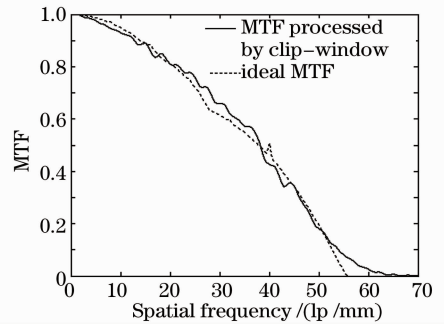


图 13 经回形窗处理的 MTF 曲线与理想曲线的比较

Fig. 13 Comparison between MTF processed by clip-window algorithm and ideal MTF

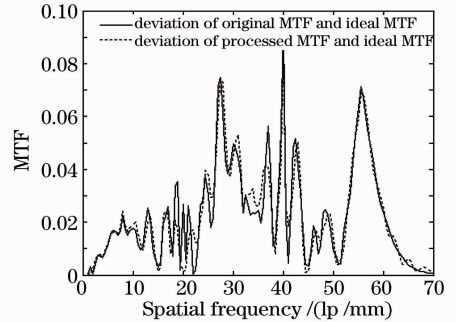


图 14 加与不加回形窗的 MTF 曲线与模拟曲线的偏差情况

Fig. 14 Deviation of MTF curve and simulated curve affected by chip-window

表 2 MTF 测量效果量化分析

Table 2 Quantitative analysis of MTF testing result

	MTF processed by clip-window	MTF before processed by clip-window
Average error	0.0138	0.0131
Mean square deviation	0.0126	0.0110

从上面的分析可知,人眼不能察觉的暗基底对基频测试数据的影响其实是很大的,采用回形窗的算法能够很好地抑制暗基底噪声对测试精度的影响,得到准确的基频数据。经过以上一系列处理后,MTF 的精确度得到明显提高,如表 3 所示。

人眼能够分辨的最低调制度为 0.05,因此镜头的截止频率为 MTF 值等于 0.05 时所对应的空间频率值,从图 13 中可以看出,此算法计算出来的镜头的截止频率  $f_c$  (即最高分辨率、Nyquist 频率) 为 57 lp/mm。而待测 CCD 的实际截止频率  $f$  为 56.7 lp/mm,则截止频率的误差为

$$e = \left| \frac{f_c - f}{f} \right| = \left| \frac{57 - 56.7}{56.7} \right| = 2.52\% \quad (11)$$

表 3 降噪前后对照表  
Table 3 Comparison before and after de-noising

Spatial frequency /(lp/mm)	Ideal MTF	Original image		Denoised image	
		MTF	Absolute error	MTF	Absolute error
5	0.9868	0.9058	-0.081	0.9744	-0.0124
10	0.9485	0.8304	0.1181	0.9293	-0.0192
20	0.8097	0.8332	-0.0235	0.8085	-0.0012
30	0.6132	0.8621	-0.2489	0.6593	0.0461
40	0.5065	0.3164	0.1901	0.4341	-0.0724
50	0.1932	0.1465	0.0467	0.1794	-0.0138

### 3.2.4 自适应平均行数算法

通过推导,倾斜的刀口测得的 MTF  $M'_T$  与实际 MTF  $M'_R$  之间存在以下关系<sup>[11]</sup>:

$$M'_T(f) = M'_R(f) \frac{\sin(\pi f n b \tan \theta)}{\pi f n b \tan \theta} = M'_R(f) \text{sinc}(n b f \tan \theta), \quad (12)$$

式中  $n$  为平均行数;  $b$  为探测器像素的纵向尺寸对应在像平面的大小;  $f$  为空间频率,单位为 lp/mm。从(11)式可以看出,导致 MTF 下降的原因跟刀口的倾斜角和平均行数有关。通过计算得到刀口像的倾斜角  $\theta=0.5^\circ$ ,控制单项误差在 0.5% 的范围内,C9300-124CCD 像素  $b=9 \mu\text{m}$ ,得到空间频率与最大允许平均行数的关系曲线,如图 15 所示。

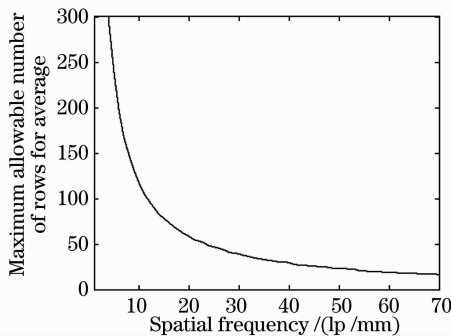


图 15 空间频率与最大允许平均行数关系曲线  
Fig. 15 Relation between spatial frequency and maximum allowable row number for average

通过图中的曲线,可以得到不同频率处所对应的允许平均行数的最大值,来确定自适应平均行数算法。

### 3.2.5 哈夫变换法

计算刀口倾斜角必须得到刀口边缘线的位置,然后对边缘线进行哈夫变换得到倾斜角<sup>[17]</sup>。

1) 获取刀口图像:刀口像在刀口处有一个大的阶跃,可以利用边缘检测算子将其转换成一个边缘的二值图像,找到刀口边缘。这里将图 3 用 'sobel' 边缘检测算子处理。获得一条略微倾斜的刀口边缘

像,如图 16 所示。

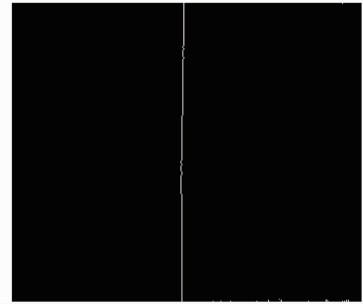


图 16 边缘线  
Fig. 16 Edge line

2) 获得刀口倾斜角:根据哈夫变换原理(点线对偶性)——对图像空间的一条直线  $y=ax+b$ ,做坐标空间变换,可以使之在参数空间的特定位置  $(a,b)$  处出现峰值,而参数坐标又可以转换为极坐标  $\cos \theta x + \sin \theta y = \rho$ ,则空间一条直线也对应着以极坐标为坐标轴的参数空间的一个点,该点即代表了该直线的倾斜角和截距。对刀口像做哈夫变换,即可得到极坐标空间内的一个点,该点的横坐标即为刀口倾斜角,如图 17 所示。

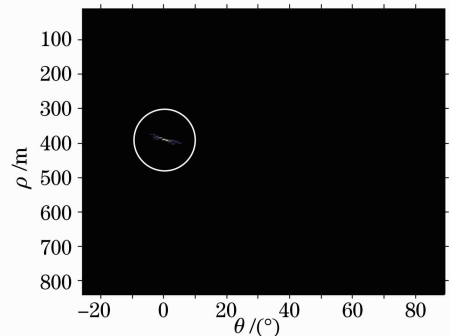


图 17 哈夫变换结果  
Fig. 17 Result by Hough transform

## 4 结 论

影响调制传递函数测量精度的主要因素是噪声对图像的干扰。根据刀口像的特点,提出一系列的

数据处理方法,提高了 MTF 的测量精度。对边缘扩展函数采用的一系列降噪算法,在消除噪声的同时保留了有用信息,最终得到近似理想的边缘扩展函数;边缘扩展函数的计算方法和降噪方法在大幅降噪的同时可以滤除造成混频现象的高频噪声;调制传递函数的降噪算法消减了基底噪声对低频数据的影响,使曲线变得更加平滑。利用曲线局部分析法实现了降噪效果数值化,可消除主观判断导致的不确定性。最终测得 CCD 的截止频率为 57 lp/mm,而实际值为 55.6 lp/mm,误差仅为 2.52%。实验证明以上方法可以实现高分辨 X 射线 CCD MTF 的高精度测量,而且样品制作和实验操作也相对简单。

从测结果来看,白斑噪声是造成测量精度下降的主要原因。而在同步辐射实验棚屋内设置各种复杂设备,其高压和电流会引起强电磁辐射,给 CCD 带来大量的白斑噪声,根据这种情况,在硬件上提出对 CCD 机体进行电磁辐射屏蔽,应该可以降低此类噪声的影响;而在数据处理上,做即时减背景处理应该可以提高图像质量。比较仿真与测试结果可以看出,仿真的截止频率处实测 MTF 值并不为 0,很可能是由混频现象引起的。

### 参 考 文 献

- 1 P. F. Judy. The line spread function and modulation transfer function of a computed tomographic scanner [J]. *Med. Phys.*, 1976, **3**(4): 233~236
- 2 R. E. Swing. The case for the pupil function[C]. *SPIE*, 1974, **46**: 104~112
- 3 H. Lavin, M. Quiek. The OTF in electro-optical imaging systems[C]. *SPIE*, 1974, **46**: 279~286
- 4 Feng Zhiwei, Cheng Haobo, Song Qian *et al.*. Modulation transfer function measurement of electron multiplying CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1710~1716  
冯志伟,程灏波,宋谦等.电子倍增电荷耦合器件的调制传递函数测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1710~1716
- 5 Li Yaobin, Kong Xiangchuang. Modulation transfer function measurement method of digital X-ray photography[J]. *J. Chinese Modern Imaging*, 2005, **2**(5): 424~425  
李兆斌,孔祥闯,余建明.数字 X 线摄影的调制传递函数测量方

- 法[J]. *中国现代影像学杂志*, 2005, **2**(5): 424~425
- 6 Yue Min Zhu, Vale'rie Kaftandjian, Gilles Peix *et al.*. Modulation transfer function evaluation of linear solid-state X-ray-sensitive detectors using edge techniques[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22): 4937~4943
- 7 E. Samei, M. J. Flynn, D. A. Reimann. A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic systems using at edge test device [J]. *Med. Phys.*, 1998, **25**(1): 102~113
- 8 P. R. Granfors, R. Aufrichtig. Performance of a  $41 \times 41 \text{ cm}^2$  amorphous silicon flat panel X-ray detector for radiographic imaging applications [J]. *Med. Phys.*, 2000, **27**(6): 1324~1331
- 9 T. Yamazakia, M. Nokita. A method to measure the presampling MTF using a novel edge test device and algorithm [C]. *SPIE*, 2004, **5368**: 696~704
- 10 J. C. Feltz, M. A. Karim. Modulation transfer function of charge-coupled devices[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(5): 717~722
- 11 Ma Weihong. Study of MTF Measurement Technique Based on Image Analysis [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005  
马卫红.基于图像分析的光学传递函数测试技术研究[D].北京:中国科学院研究生院, 2005
- 12 Wang Wanli, Jiang Xiaoguo, Wu Tinglie *et al.*. Data processing method of measuring CCD imaging MTF with step sample[J]. *J. Opto. • Laser*, 2002, **13**(2): 173~175  
王婉丽,江孝国,吴廷烈等.台阶法测量 CCD 成像系统 MTF 的数据处理方法[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(2): 173~175
- 13 Ding Xiaohua, Li You, Yu Qifeng *et al.*. CCD Noise calibration and its application in edge location[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~104  
丁晓华,李由,于起峰等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 99~104
- 14 Zhang Hanling. Matlab in Image Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008  
张汗灵. Matlab 在图像处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2008
- 15 Bai Junqi, Chen Qian. Algorithm for infrared image noise filtering based on anisotropic diffusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 866~869  
白俊奇,陈钱.基于各向异性扩展的红外图像噪声滤波算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 866~869
- 16 Huang Zhen. The Study of MTF Test Base on Digital Fourier Analysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007  
黄震.基于数字傅里叶分析法的 MTF 测试研究[D]. 西安:西安工业大学, 2007
- 17 Ye Xun. A Digital X-ray Imaging System for Small-Animal Studies [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004  
叶昶.用于小动物研究的数字 X 射线成像系统[D]. 武汉:华中科技大学, 2004