

一种光电成像系统调制传递函数的测量方法

徐保树^{1,2,3,4} 史泽林^{1,3,4} 冯 斌^{1,2,3,4}

¹ 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016

² 中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016

⁴ 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016

摘要 调制传递函数(MTF)是设计和评价光电成像系统的重要参数,在证明了边缘图像的边缘扩展函数与累积直方图逆函数存在着线性关系的基础上,提出了一种基于统计直方图的 MTF 测量方法,设计了包括光学系统和探测器的仿真实验,搭建了包括积分球、靶标、平行光管和数字摄像机等装置的物理实验平台,以光电成像系统的设计参数和理论模型得到的理论曲线为参考依据,通过仿真实验和物理实验验证了该方法的有效性。实验结果表明,与传统 MTF 测量方法相比,该方法克服了成像探测器欠采样引起的相位效应,对刀口倾斜角度变化和噪声具有稳健性,可测量超过采样频率的响应特性。

关键词 成像系统;调制传递函数;边缘扩展函数;累积直方图

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1111004

Modulation Transfer Function Measurement Method of Electro-Optical Imaging System

Xu Baoshu^{1,2,3,4} Shi Zelin^{1,3,4} Feng Bin^{1,2,3,4}

¹ Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

⁴ Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision, Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110016, China

Abstract Modulation transfer function (MTF) is one of significant parameters for designing and evaluating an electro-optical imaging system. By proving the linear relation between an edge spread function and an inverse cumulative histogram of edge, an MTF measurement method based on statistical histogram is presented. Simulation and experiment including optics and detectors are designed. Physical experimental platform including an integrating sphere, target, collimator, digital camera and other devices is developed. Taking the theoretical model and design parameters of electro-optical imaging system as a reference, the validity of our measurement method is verified by the simulation and experiment. Experimental results indicate that, comparing with the existing MTF measurement method, the proposed method can overcome the phase effects which is caused by under-sampling of imaging detector. It is more robust to angle of knife edge and noisy environment, and can measure response properties beyond the sampling frequency of an electro-optical imaging system.

Key words imaging system; modulation transfer function; edge spread function; cumulative histogram

OCIS codes 110.2900; 110.3000; 110.4100; 120.4800

收稿日期: 2011-04-18; **收到修改稿日期**: 2011-06-02

基金项目: 国家 973 计划和中国科学院国防科技创新基金项目(CXJJ-11-S97)资助课题。

作者简介: 徐保树(1985—),男,博士研究生,主要从事光电成像系统设计与评价等方面的研究。E-mail: bsxu@sia.cn

导师简介: 史泽林(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电成像、图像处理、目标识别与跟踪及精确制导等方面的研究。E-mail: zlshi@sia.cn

1 引 言

光电成像系统的调制传递函数(MTF)从空间分辨率角度表征了光电成像系统真实复现外界场景的能力,是用于光电成像系统论证、设计、分析、测试和评价的基本参数。MTF 通常有两类测试方法^[1]: 1)直接法,设置不同空间频率的正弦靶标,通过观测系统响应直接得到测试结果;2)间接法,利用刀口靶或狭缝靶获取图像计算扩展函数,再通过傅里叶变换得到 MTF。间接方法是常用的方法,尤其刀口测量法因为操作方便、靶标易于加工和不受衍射干扰等优点得到普遍应用^[2],被国际标准 ISO12233 指定为测量 MTF 的标准方法^[3]。

刀口测量法在成像领域得到广泛应用。除光电成像系统的实验室性能测量与评价外,在遥感领域,文献[4,5]采用刀口法从遥感图像中选取具有边缘特性的地面标志物来测量在轨光学遥感器的 MTF,从而评价在轨遥感器的成像品质;在医学成像领域,文献[6,7]采用刀口法测量数字化 X 射线成像系统的 MTF 来指导系统性能分析和评价。

目前测量方法依旧存在不足:测量结果受采样相位效应和噪声的影响不稳定、在高频部分存在正偏差、不能反映采样频带外的 MTF。这些不足导致测量结果不能准确地反映系统设计。如高频部分正偏差过高估计了系统对细节的分辨能力,可能掩盖系统设计上的不足,对于工作在远距离小目标的空空导弹光电成像导引头问题更加严重。

2 传统刀口测量法

2.1 垂直刀口测量法

刀口测量法是以刀口靶标作为目标物,通过光电成像系统获取刀口靶标图像,在图像上选取有效区域,垂直边缘方向上对区域求和得到边缘扩展函数(ESF),利用边缘扩展函数与线扩展函数的微分关系计算得到线扩展函数(LSF),经傅里叶变换得到调制 MTF,如图 1 所示。

2.2 倾斜刀口测量法

探测器导致边缘扩展函数往往是欠采样的,具体表现在测量结果随靶标和待测系统相对位置的变化而变化。为克服欠采样对测量结果的影响,需要采取措施提高边缘扩展函数的采样率。其中将靶标与探测器成一定倾角摆放是提高采样率的方法之一^[2]。传统刀口测量法相当于只利用一行的数据信息,可以看作图 2(a)中的任何一行,由于采样间隔

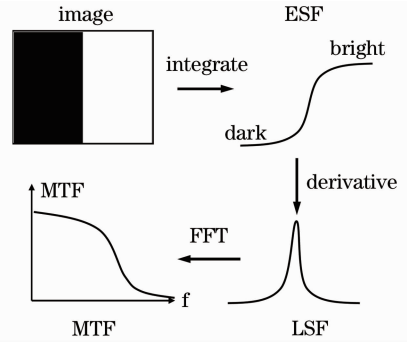


图 1 垂直刀口测量法

Fig. 1 Vertical knife-edge measurement method

过大,图 2(a)中的任何一行都不能真实反映边缘,仅用一行数据表示边缘存在信息丢失过多的问题;如果将靶标与探测器成一定倾角摆放,综合利用多行数据重构边缘扩展函数,边缘信息能够得到更多保留,图 2(b)中 4 行数据重构的边缘扩展函数已比较接近真实的边缘变化。White 等^[8]证明了在没有噪声时对 ESF 采样 10 个点是不够的。

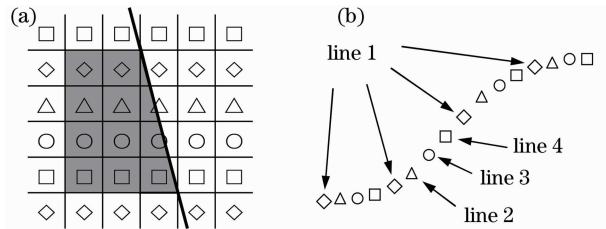


图 2 倾斜刀口法重构 ESF。(a)边缘示意图; (b)多行重构 ESF

Fig. 2 Reconstructed ESF by slanted knife-edge method. (a) Schematic diagram of edge; (b) reconstruction of ESF by multi-line

除采样过程带来的相位误差外,实际测量中由于噪声、采样混叠、靶标加工精度和探测器非均匀性等问题存在,上述方法的 MTF 测量曲线也会不稳定,表现为抖动剧烈、高频峰值太高和缺乏重复性等现象^[2]。克服这些现象的一条途径是通过平滑滤波来降低噪声的影响,另一条途径是根据边缘方向存在的周期性,利用多个周期的信息得到 MTF。文献[9~11]综合采用了这两条途径,得到了更接近实际的结果。但是,滤波带来了附加信息,并且存在滤波背景噪声过多或过少的问题,获得的 MTF 曲线与实际值不一致^[2]。另外,Buhr 等^[12]通过理论分析和实验证明:沿边缘方向投影时存在相位效应,利用周期性得到的 MTF 在系统采样频率整数处的误差将会很大。本文通过实验得出了相同的结论。因此,为使测量结果更鲁棒更接近真实值,需要从信息

处理的源头开始,提出充分利用图像信息的新方法。

3 基于直方图的倾斜刀口测量法

对传统的倾斜刀口测量法做了改进,首先证明边缘图像的边缘扩展函数与累积直方图逆函数之间存在着线性关系,在其基础上提出一种基于统计直方图的倾斜刀口测量法。

3.1 理论基础

直方图是图像灰度的概率密度分布函数,累积直方图是图像灰度的概率分布函数,一般图像的直方图和累积直方图不反映图像的空间信息。但是,由于边缘图像从图像的一侧向另一侧明暗单调递增,平缓的边缘具有较多的灰阶和中等灰度像素数,陡峭的边缘具有较少的灰阶和中等灰度像素数。累积直方图正是灰阶和灰阶分布的具体表现方式,因此,边缘图像的累积直方图具有一定的特殊性,体现了边缘图像的边缘变化情况。累积直方图的逆函数与边缘扩展函数具有线性关系,下面证明边缘图像的边缘扩展函数和累积直方图逆函数具有线性关系。

已知两个随机变量 X 和 Y ,其中 Y 在有效区间内是 X 的单调函数,具有关系 $y = f_{\text{ESF}}(x)$,如图 3 所示。

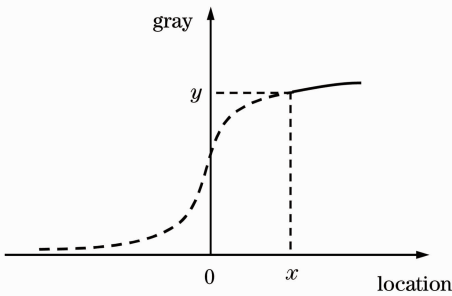


图 3 边缘扩展函数

Fig. 3 Edge spread function

因为 Y 是关于 X 的单调函数,所以对于图 3 中函数曲线任一点 (x, y) 存在:

$$P(Y \leq y) = P(X \leq x), \quad (1)$$

式中 X 是自变量,在有效取值区间内服从均匀分布。根据边缘扩展函数特征,其有效取值区间有限且连续,所以有

$$P(X \leq x) = kx + b, \quad (2)$$

式中 k 和 b 是常数,取值取决于 x 的有效取值区间,且 $k \neq 0$ 。

随机变量 Y 的概率分布函数与累积直方图 (f_{CH}) 等价,即

$$P(Y \leq y) = f_{\text{CH}}(y) = f_{\text{CH}}[f_{\text{ESF}}(x)]. \quad (3)$$

根据(1)~(3)式,得到

$$f_{\text{CH}}[f_{\text{ESF}}(x)] = kx + b. \quad (4)$$

不妨将函数定义在有效取值区间上,(4)式两边对 f_{CH} 求逆运算,得到

$$f_{\text{ESF}}(x) = f_{\text{CH}}^{-1}(kx + b). \quad (5)$$

从(5)式可知,边缘图像的边缘扩展函数的逆函数与边缘扩展函数具有线性关系,经去均值、幅值归一化和调整区间等措施,利用累积直方图获取边缘扩展函数是可行的。

3.2 基于直方图的倾斜刀口测量法

利用获取的倾斜刀口图像,根据累积直方图和边缘扩展函数的关系,提出了光电成像系统 MTF 的测量方法,主要步骤如下:

- 1) 截取有效图像区域,并记录区域行数 and 列数;
- 2) 统计区域图像的灰度直方图,进一步统计累积直方图;
- 3) 对累积直方图求逆、去均值、补零调节区间长度得边缘扩展函数;
- 4) 边缘扩展函数微分运算得到线扩展函数;
- 5) 对线扩展函数进行傅里叶变换、取模、幅值归一化和截取有效频率区间,得到调制传递函数。

3.3 有效性分析

基于累积直方图的方法(本文方法)更充分地利用边缘图像信息,与传统的倾斜刀口测量方法(原方法)相比具有以下方面的优势:

1) 原方法中刀口倾斜角的余切代表了重构边缘扩展函数的行数,测量结果受刀口倾斜角影响大,要求测量系统有高精度的安装角,且在大倾斜角时存在初始采样相位问题;本文方法利用边缘图像的所有行,不要求系统安装角精度和初始采样相位,甚至采样相位分布越分散越好。

2) 噪声直接反映在原方法的边缘扩展函数上,而对累积直方图形状的影响较小,故本文方法与原方法相比有较好抗噪性。

3) 原方法虽然利用多行重构边缘扩展函数,但是从本质上每条边缘扩展函数构成的是一个周期,故只能测量采样频率内的响应特性;本文方法将边缘图像的多个周期信息反映在累积直方图上,能测量超过采样频率的响应特性。

4 光电成像系统 MTF 理论模型

光电成像系统的 MTF 理论模型为验证测量方法提供了参考依据,一般光电成像系统 MTF 是光

学系统、振动、探测器、电子电路和信号处理等所有单元环节 MTF 的乘积,为使成像过程尽量可控,本文主要针对光学系统和探测器两个环节。

光学部分由衍射和像差两部分构成。圆孔径光学系统的衍射 MTF 为

$$f_{\text{diff}}^{\text{MTF}}(f) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{f}{f_{\text{cut}}}\right) - \left(\frac{f}{f_{\text{cut}}}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{\text{cut}}}\right)^2} \right], \quad (6)$$

式中 f 是空间频率,单位 cycle/mrad; f_{cut} 是衍射截止频率, $f_{\text{cut}} = D/(1000\lambda)$, 单位 cycle/mrad; λ 是透射光的中心波长,单位 nm; D 是光学系统的口径,单位 mm。

光学系统像差的 MTF 为

$$f_{\text{aber}}^{\text{MTF}}(f) = \exp[-2(\pi\sigma f/F_L)^2], \quad (7)$$

式中 σ 为高斯像差弥散斑半径,单位 μm ; F_L 是系统焦距,单位为 mm。

探测器由光信号收集部分、扩散部分和转移部分三部分构成,其中光信号收集部分起主要作用,矩形像元探测器的 MTF 近似为

$$f_{\text{det}}^{\text{MTF}}(f) = \text{sinc}(S_{\text{DA}}f), \quad (8)$$

式中 S_{DA} 是探测器角弦, $S_{\text{DA}} = d/F_L$, 单位 mrad; d 是探测器像元尺寸,单位 μm 。

系统 MTF 是单元环节 MTF 的乘积,所以光学系统和探测器构成的光电成像系统 MTF 理论值为

$$f_{\text{sys}}^{\text{MTF}}(f) = f_{\text{diff}}^{\text{MTF}}(f) f_{\text{aber}}^{\text{MTF}}(f) f_{\text{det}}^{\text{MTF}}(f). \quad (9)$$

5 仿真实验

5.1 仿真实验设计

根据通用的成像模型,利用全数字仿真方法,通过模拟成像过程的光学系统和探测器生成仿真图像,设计了仿真实验(图 4)。

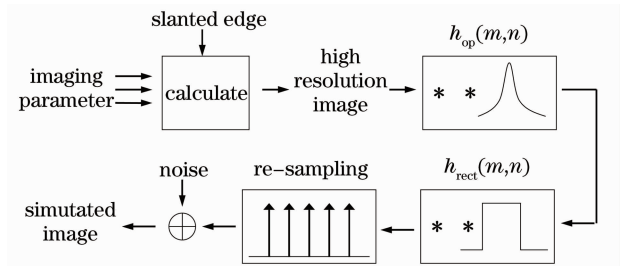


图 4 仿真图像生成过程

Fig. 4 Generation procedure of simulated image

5.1.1 仿真图像生成

探测器成像之前的光学图像是空间上连续具有无限细节的连续信号,而计算机的存储和计算都是以数字形式进行的,在数字计算机上模拟连续光学

信号存在分辨率问题。实验中采用高分辨率图像来表示模拟信号, Fiete^[13] 指出,为模拟成像过程中的光学模糊和采样等效效应,输入图像的分辨率至少是生成图像分辨率的 4 倍。为减少图像的数字化的信息损失,更加真实地模拟成像,实验中输入图像分辨率是生成图像分辨率的 10 倍。

光学系统的模糊效应使输入图像高频信息丢失,采用高斯型低通滤波器模拟光学系统,在卷积运算前将滤波器换算到高分辨率数字图像空间为

$$h_{\text{op}}(m,n) = \frac{1}{2\pi(\sigma/F_L)^2} \times \exp\left[-\frac{(mS_{\text{DA}x}M)^2 + (nS_{\text{DA}y}M)^2}{2(\sigma/F_L)^2}\right], \quad (10)$$

式中 σ 为高斯模糊斑半径,单位 μm ; $M=10$, 是高分辨率图像对应的放大倍数。

探测器收集像平面上的光子并转换成电荷,探测器光电转换过程从空间效应上看可分为两个阶段:1)在有效感光像元区域内对成像光学信号积分,2)以像元间隔在空间上采样。积分过程可以理解为单个像元在成像光学信号上连续移动,得到连续输出的图像信息;采样过程是在积分的基础上对连续图像的理想离散采样过程。矩形探测器的响应函数见(11)式,实验中以高分辨率图像近似表示输入的成像光学信号,探测器的响应函数与高分辨图像进行卷积运算,从而模拟探测器对成像光学信号的空间积分效应;(12)式表示对高分辨率图像进行重采样处理,将其转化为实际像元数的图像。矩形探测器响应函数表示为

$$h_{\text{rect}}(m,n) = \left[\frac{1}{S_{\text{DA}x}} \text{rect}\left(\frac{mS_{\text{DA}x}M}{S_{\text{DA}x}}\right) \right] \times \left[\frac{1}{S_{\text{DA}y}} \text{rect}\left(\frac{nS_{\text{DA}y}M}{S_{\text{DA}y}}\right) \right], \quad (11)$$

式中 $S_{\text{DA}x}$ 和 $S_{\text{DA}y}$ 分别是 x 方向和 y 方向的探测器角弦。重采样处理表示为

$$h_{\text{sp}}(m,n) = \sum_k \sum_l \delta(m - kM) \delta(n - lM), \quad (12)$$

式中 k 和 l 是整数,根据数字图像空间的范围确定取值范围。

白噪声、附加噪声和时间噪声等随机因素对估计 MTF 引入了正偏差,有噪声时的 MTF 一般大于没有噪声时的 MTF^[2]。在验证噪声对 MTF 测量性能的影响实验中,仿真图像加入了独立同分布的高斯白噪声,使生成图像的信噪比为 40 dB。

实验中采用的主要成像参数如表 1 所示。根据表 1 的参数,图 5 是刀口倾斜角度为 7.1° 时生成的两幅实验源图像,图 5(a)没有噪声,图 5(b)信噪比 40 dB。

表 1 仿真实验的主要参数

Table 1 Main parameters of simulation

Concept	Parameter
Slant angle / ($^\circ$)	14/ 7.1/ 4.76/ 3.58
Focal length /mm	70
Input image resolution	3200×2560
Optics blur spot size / μm	2
Number of detectors	320×256
Detector size / μm	8.6×8.3
Fill factor /%	100
R_{SN}/dB	$\infty, 40$

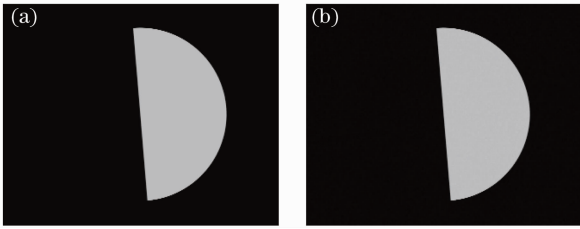


图 5 按表 1 参数生成的仿真图像。(a)无噪声;
(b)信噪比 40 dB

Fig. 5 Generated simulation images through parameters in table 1. (a) without noise; (b) $R_{SN} = 40$ dB

5.1.2 实验过程

仿真实验的主要过程如下:

1) 采用 14° , 7.1° , 4.76° 和 3.58° 四个倾斜角度生成无噪声和有噪声两类仿真图像,这四个角度分别代表插值次数 4, 8, 12 和 16;

2) 根据成像参数和光电成像系统的理论模型得到 MTF 理论曲线作为参考依据;

3) 利用图 2 所示的倾斜刀口测量法,通过生成的仿真图像获取 MTF,称为原方法,用来与本文方法做比较;

4) 利用本文提出的基于直方图的倾斜刀口测量法,通过生成的仿真图像获取 MTF;

5) 以理论值为参考依据,比较原方法的结果和本文方法的结果,并分析误差。

5.2 实验结果与分析

5.2.1 仿真实验的 MTF 理论曲线

根据表 1 的参数,光学系统弥散斑直径 $2 \mu\text{m}$,探测器像元尺寸 $8.6 \mu\text{m}$,得到的光电成像系统 MTF 理论值如图 6 所示。系统采样频率为 8.14 cycle/mrad ,尼奎斯特采样频率为 4.07 cycle/mrad ,系统 MTF 理论曲线的零点在系统采样频率整数倍位置。根据尼奎斯特采样定律,输入信号最高频率超过尼奎斯特采

样频率(系统采样频率一半)时会有频谱混叠效应。但是,实际物理信号一般是非带限的,具有无限的频谱,图 6 中将最高频率设为系统采样频率的 4 倍。

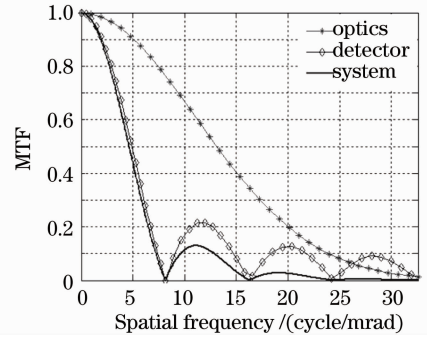


图 6 仿真实验的 MTF 理论曲线

Fig. 6 MTF theoretical curves by simulation

5.2.2 刀口倾角对 MTF 测量结果的影响

图 7 是在没有噪声时得到的实验结果,图中理论值由成像参数计算得到,表示真实的 MTF,原方法结果由图 2 的测量方法得到,本文方法结果由 3.2 节提出的方法得到。为突出比较系统采样频率之内的测量结果,将空间频率限制在系统采样频率之内。

图 7(a)是刀口倾斜角 14° 的结果,从图中可以看到原方法结果曲线在理论曲线之上,随着空间频率增加误差逐渐加大,在尼奎斯特频率处达到最大 0.2494,本文方法结果与理论值相近,最大误差为 0.0128,如表 2 所示。减少刀口倾斜角度,在 7.1° , 4.76° , 3.58° 时的测量曲线如图 7(b)~(d),随着空间频率增加时原方法误差逐渐增大,本文提出方法的测量结果一直与理论曲线很接近。

表 2 没有噪声时仿真实验结果的误差

Table 2 Error of simulation results without noise

Slant angle / ($^\circ$)	Method	$0 \sim f_s/2$	$f_s/2 \sim f_s$	$0 \sim f_s$
14	Original	0.0227	0.1591	0.0914
	This paper	0.0052	0.0091	0.0072
7.1	Original	0.0189	0.0929	0.0562
	This paper	0.0049	0.0042	0.0046
4.76	Original	0.0167	0.0668	0.0420
	This paper	0.0017	0.0083	0.0050
3.58	Original	0.0106	0.0484	0.0296
	This paper	0.0006	0.0013	0.0009

表 2 统计了尼奎斯特频率之内、尼奎斯特频率和采样频率区间内、系统采样频率之内的平均误差,从表中可以看出本文方法有更好的性能,误差远低于原方法。对比这四个角度的结果,随着刀口倾斜角度减小,原方法的误差减小。

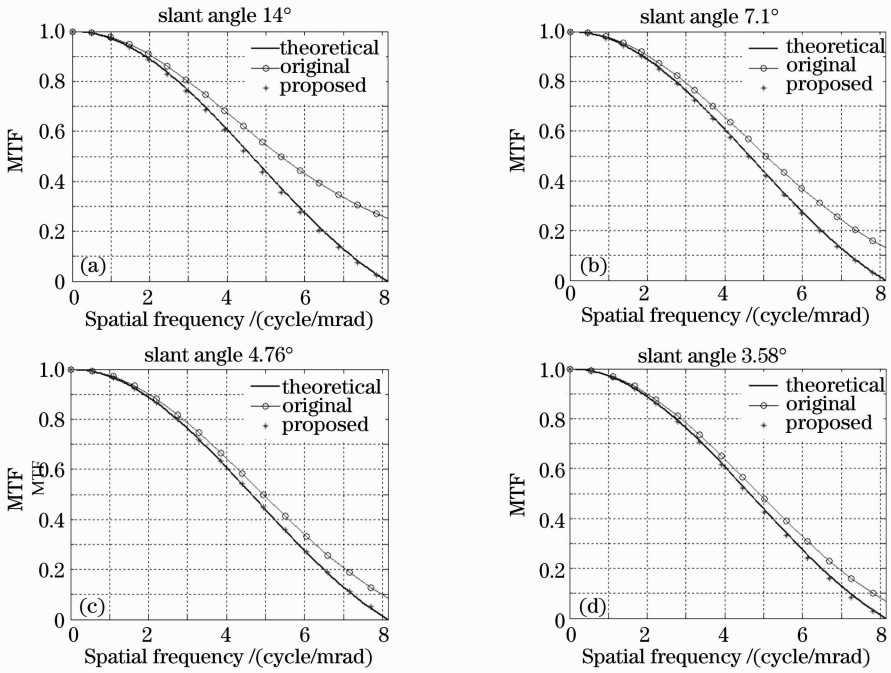


图 7 没有噪声时仿真实验结果

Fig. 7 Simulation results without noise

5.2.3 噪声对 MTF 测量结果的影响

为验证噪声对 MTF 测量结果的影响,在生成仿真图像时加入独立同分布的高斯白噪声,使生成图像的信噪比为 40 dB,实验结果如图 8 所示。

从图 8 中可以得出结论:1)原方法受噪声干扰影响较大,尤其在高频时影响更加剧烈,随着倾斜角

度减小,测量结果逐渐趋于稳定,后两幅图像中误差大致相当;2)本文方法与理论曲线接近,几乎不受倾斜角度影响,在低于尼奎斯特频率的低频段测量结果低于理论值,尼奎斯特频率到系统采样频率之间的高频段测量结果高于理论值,经分析是由于白噪声导致信号混叠引起的,在后续工作中针对背景噪

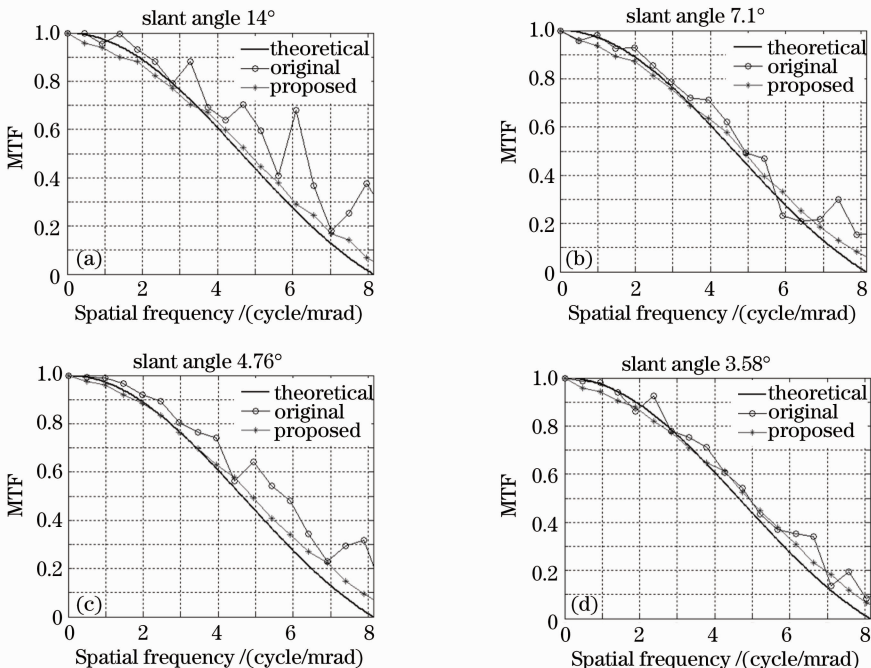


图 8 信噪比 40 dB 时仿真实验结果

Fig. 8 Simulation results at $R_{SN} = 40$ dB

声研究抑制和校正方法。

5.2.4 采样频带外的 MTF 测量

欠采样是采样成像系统普遍存在的问题,带来的信号混叠将影响成像质量,准确地测量系统在全频率范围内的响应对光电成像系统设计和评价极为重要。图 9 是在 4 倍系统采样频率范围内的测量结果,图 9(a)是在没有噪声时的测量结果,原方法几乎不能反映系统超过尼奎斯特频率的响应,而本文

方法与理论结果具有较好的一致性。图 9(b)是在图像信噪比 40 dB 时的测量结果,有噪声存在时原方法超过系统采样频率后不可用,本文方法虽然在超过系统采样频率后误差较大,一定程度的受噪声影响,但是测量结果能够反映光电成像系统的响应趋势,如果增大信噪比,将趋向图 9(a)的结果,与理论曲线逐渐接近一致。

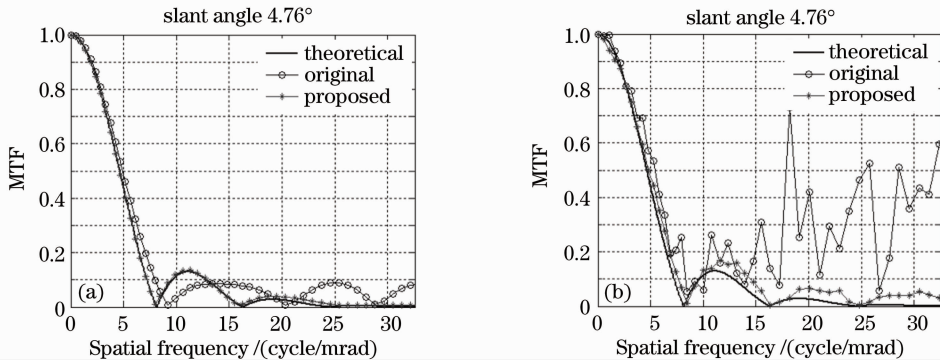


图 9 在 4 倍采样频率范围内的仿真实验结果。(a)无噪声;(b)信噪比 40 dB

Fig. 9 Simulation results within 4 times of sampling frequency. (a) Noiseless; (b) $R_{SN} = 40$ dB

6 物理实验

6.1 物理实验设计

在理论分析和仿真研究基础上设计了物理实验,主要实验装置有积分球、刀口靶标、平行光管、数字摄像机、数字图像采集卡和计算机等,图 10 是物理实验系统的框图,图 11 是实验现场图像。其中积分球是可控光源,发出均匀光投射在靶标上,通过平行光管后形成准直的光线到达数字摄像机,CCD 对其成像获得数字格式的视频图像数据,图像采集卡采集数据后传输到计算机进行数据处理。为避免杂散光、振动和非线性处理等因素的干扰,数字摄像机放在暗室的光学隔振平台上,并取消了数字摄像机的自动增益控制和伽马校正等。

光学系统的像差由球差、色差、彗差和光学畸变

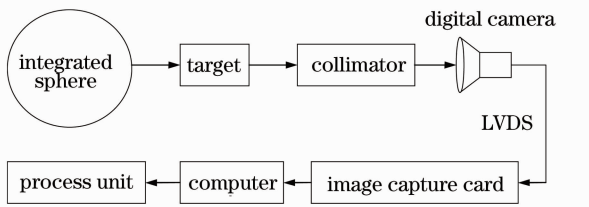


图 10 物理实验平台框图

Fig. 10 Block diagram of the physical experiment platform

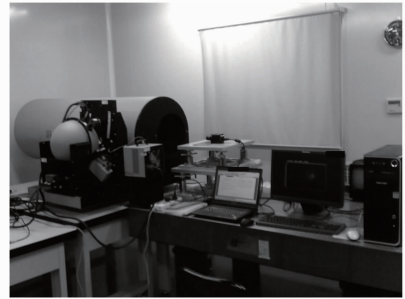


图 11 物理实验现场

Fig. 11 Physical experiment site

等构成,影响因素太多导致像差不易控制和获取。因此,为使实验条件可控和结果稳定可靠,避免像差因素的干扰,使衍射 MTF 占主要作用,设计实验时尽量采用较大的 F 数。

物理实验系统的主要参数如表 3 所示。从表 3 的参数得到:对于 70 mm 镜头,光学衍射截止频率为 7.29 cycle/mrad,探测器采样频率为 8.14 cycle/mrad,尼奎斯特频率为 4.07 cycle/mrad;对于 35 mm 镜头,光学衍射截止频率为 3.65 cycle/mrad,探测器采样频率为 4.07 cycle/mrad,尼奎斯特频率为 2.03 cycle/mrad。通过空间频率的对比得出两条结论:1)摄像机是探测器受限的;2)在超过衍射截止频率后成像系统的 MTF 为 0。

表 3 物理实验装置主要参数

Table 3 Main parameters of physical experimental device

	Concept	Parameter
Integration sphere	Color temperature /K	2950±25
	Luminance f_L /	1000
	Uniformity /%	> 98
Target	Knight size /mm	$\phi 42$
Collimator	Focal length /mm	1520
Lens	Focal length /mm	70/35
	F number	16/8/4/2.8/1.4
CCD detector	Wavelength /nm	400~800
	Number	752×582
	Pixel size /($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	8.6×8.3
	Fill factor /%	100
	Integration time /ms	0.1 ~ 100
Data	A/D depth /bit	12
	Non-uniformity /%	< 0.2
	Gain /dB	0
	format	LVDS

图 12 是根据摄像机参数计算的 MTF 理论曲线,光电成像系统依旧响应超过尼奎斯特频率的高频信号,但是衍射效应导致超过光学衍射截止频率的高频成分丢失,最终光电成像系统的截止频率是光学衍射截止频率。

6.2 实验结果与分析

第一个实验采用焦距 70 mm 的光学镜头, F 数为 16,首先在刀口靶标垂直时采集多幅图像并统计信噪比,累计 25 frame 计算得图像信噪比为 45.0 dB,即本实验的图像信噪比是 45.0 dB;然后分别将刀口靶倾斜 5° 和 10° ,数据处理模块采集的图像如图 13(a),(b)所示,测量结果如图 13(c),(d)所示,实验 I 的平均误差如表 4 所示。从测量结果可以看出,在低频时原方法能够准确观测并反映实际系统响应,随着空间频率增加,误差逐渐加大,接近尼奎斯特频率时有较大误差,进一步提高空间频率误差接近 0.4,方法几乎

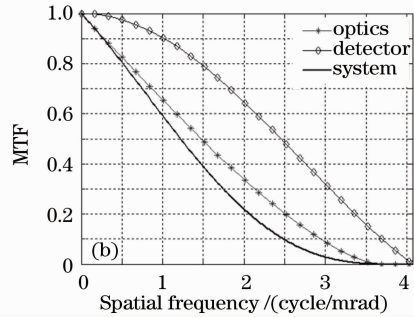
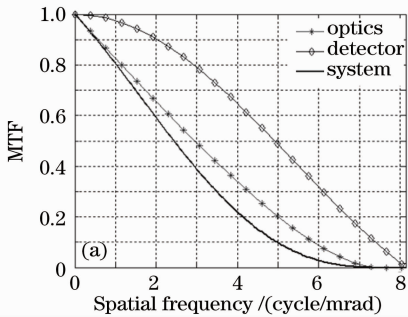


图 12 数字摄像机的 MTF 理论曲线。(a) 70 mm 镜头; (b) 35 mm 镜头

Fig. 12 MTF theoretical curves of digital camera. (a) 70 mm lens; (b) 35 mm lens

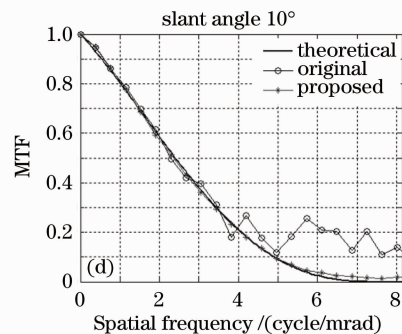
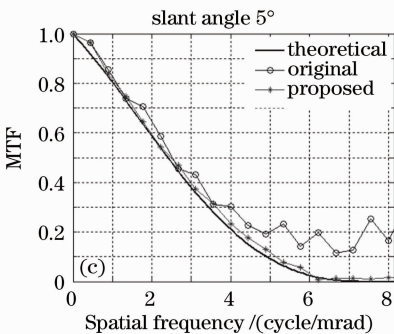
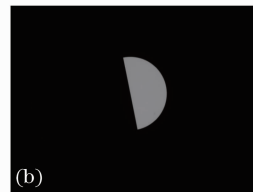
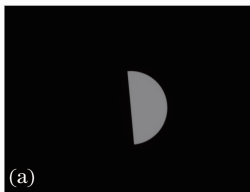


图 13 物理实验 I 的实验结果

Fig. 13 Results of physical experimental I

失效;本文方法的测量结果与理论曲线有较好的一致性,能够观测并反映实际光电成像系统的响应,并且当刀口倾斜角的变化时,实验结果几乎保持不变,具有较高的稳健性。

表 4 物理实验 I 的平均误差

Table 4 Average error of physical experiment I

Slant angle / (°)	Method	$0 \sim f_s/2$	$f_s/2 \sim f_s$	$0 \sim f_s$
5	Original	0.0186	0.1444	0.0815
	This paper	0.0129	0.0169	0.0149
10	Original	0.0194	0.1238	0.0716
	This paper	0.0165	0.0101	0.0133

第二个实验采用焦距 35 mm 的光学镜头, F 数为 16,首先在刀口靶标垂直时采集多幅图像并统计

信噪比,累计 25 frame 计算得图像信噪比为 43.1 dB,即本实验的图像信噪比是 43.1 dB;然后分别将刀口靶倾斜 5° 和 13° ,数据处理模块采集的图像如图 14(a),(b)所示,测量结果如图 14(c),(d)所示,实验 II 的平均误差如表 5 所示。从图中可以得到如前文相似的结论,但是当空间频率增大时,本文方法测量结果曲线低于理论曲线,经深入分析是因为理论值没有考虑光学系统的像差导致偏高的,对于较短焦距的光学镜头,一般应用在近距离大视场的场合,本实验系统生成的准平行光线进入镜头后很难完全会聚到成像焦平面上,导致较大的像差,高频分量受到的影响更加明显。因此,图 14 中误差主要成因不是测量方法导致的,有待进一步分析。

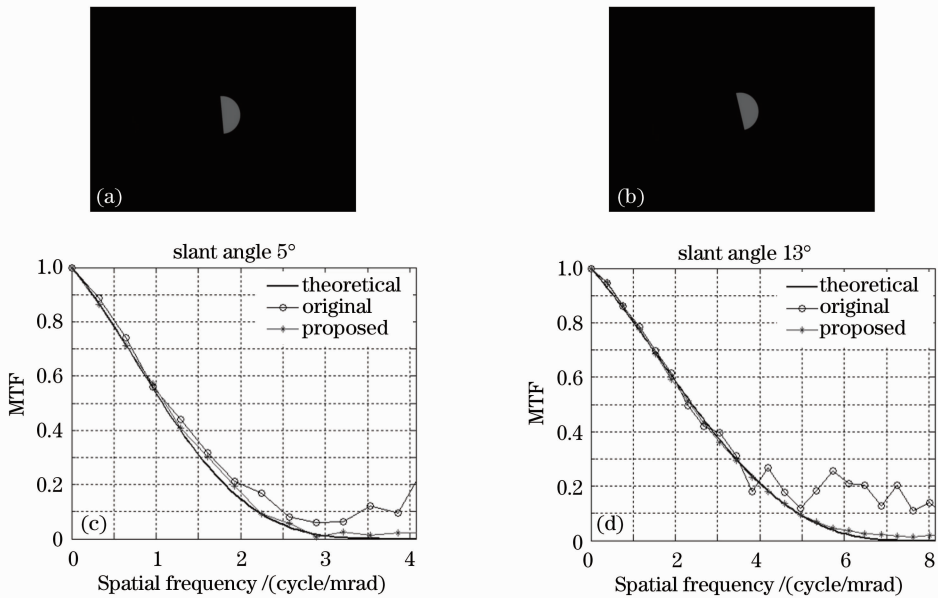


图 14 物理实验 II 的实验结果

Fig. 14 Results of physical experiment II

表 5 物理实验 II 的平均误差

Table 5 Average error of physical experiment II

Slant angle / (°)	Method	$0 \sim f_s/2$	$f_s/2 \sim f_s$	$0 \sim f_s$
5	Original	0.0250	0.0656	0.0455
	This paper	0.0160	0.0111	0.0135
13	Original	0.0296	0.0826	0.0561
	This paper	0.0118	0.0112	0.0115

7 结 论

分析和证明了刀口图像的边缘扩展函数与累积直方图之间的内在关系,提出了一种基于统计直方图的倾斜刀口 MTF 测量方法,通过仿真实验和物理实验验证了该方法的有效性。结果表明,与传统

MTF 测量方法相比,在没有数据滤波处理等降噪措施的前提下,本文方法能更好地适应刀口倾斜角的变化和噪声,并适用于测量超过系统采样频率的系统响应。下一步将采取数据滤波处理等措施,完善现有的测量方法和测量装置,并搭建测量红外成像系统 MTF 的物理实验平台,对红外成像系统的进行 MTF 测量。

参 考 文 献

- 1 Michael C. Dudzik. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Vol. 4: Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing[M]. Bellingham: SPIE PRESS, 1993. 199~201
- 2 Gerald C. Holst. Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems[M]. Florida: JCD Publishing, 2008. 219~274
- 3 International Organization for Standardization. Photography-electronic still-picture cameras-resolution measurements [S].

- 2001, ISO12233;2001
- 4 Zhao Zhanping, Fu Xingke, Huang Qiaolin *et al.*. On orbit MTF test research of remote sensors based on knife-edge method[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, **30**(2): 37~43
赵占平, 付兴科, 黄巧林等. 基于刃边法的航天光学遥感器在轨 MTF 测试研究[J]. *航天返回与遥感*, 2009, **30**(2): 37~43
 - 5 Dai Qiyan, Xia Deshen. Performance analysis of MTF measurement using edge method[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, **27**(3): 22~27
戴奇燕, 夏德深. 刀刃法在轨 MTF 测量性能分析[J]. *航天返回与遥感*, 2006, **27**(3): 22~27
 - 6 Zhang Xiaolin, Du Guohao, Deng Bao *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
 - 7 Gong Shaorun, Gao Feng, Xu Yajie. Edge measurement for modulation transfer function in digital radiography X-ray imaging system[J]. *J. Tianjin University*, 2010, **43**(7): 611~618
龚绍润, 高峰, 徐雅洁. 数字化 X 射线成像系统 MTF 的刀口测量法[J]. *天津大学学报*, 2010, **43**(7): 611~618
 - 8 Benjamin S. White, Michael J. Marquis. Vertical MTF measurements[C]. *SPIE*, 1993, **1969**: 165~176
 - 9 Xinhua Cao, H. K. Huang, Shyh L. Lou. A novel algorithm for measuring the MTF of a digital radiographic system with a CCD array detector[C]. *SPIE*, 2000, **3977**: 580~589
 - 10 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
 - 11 Li Tiecheng, Feng Huajun, Xu Zhihai *et al.*. New analytical line spread function fitting model for modulation transfer function calculation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3454~3459
李铁成, 冯华君, 徐之海等. 一种可用于调制传递函数计算的新型线扩展函数拟合模型[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3454~3459
 - 12 Egbert Buhr, Susanne Günther-Kohfahl, Ulrich Neitzel. Simple method for modulation transfer function determination of digital imaging detectors from edge images[C]. *SPIE*, 2003, **5030**: 877~884
 - 13 Robert D. Fiete. Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras [M]. Bellingham: SPIE Press, 2010. 190~191

栏目编辑: 李文喆