

## 红外系统 MTF 狭缝测量法的改进

刘小冬<sup>1,2</sup>, 张新<sup>1</sup>, 王灵杰<sup>1</sup>, 张建萍<sup>1</sup>, 伍雁雄<sup>1</sup>

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 介绍了应用狭缝结合二维傅里叶变换测量光学系统尤其是红外光学系统的基本原理。由于光电探测器的对图像采集的离散性造成傅里叶变换频谱的混频, 以及高频旁瓣过多现象, 为了提高 MTF 测量的精确性, 采用 MATLAB 模拟仿真的方法对狭缝测量法进行两部分改进, 分别为倾斜狭缝和平滑照明。倾斜狭缝部分给出了倾斜角度与频谱值的关系曲线, 平滑照明部分给出线性和高斯两种平滑方案。两部分改进方案均给出模拟结果, 改进的效果显著。

**关键词:** 狭缝法; MTF; 倾斜狭缝; 平滑照明

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2009)09-0521-04

## The Improvement of Slit Method in MTF Testing of Optical Systems

LIU Xiao-dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, WANG Ling-jie<sup>1</sup>, ZHANG Jian-ping<sup>1</sup>, WU Yan-xiong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The principle of MTF testing for optical systems, especially the infrared systems was introduced, by combining slit method with 2D-fourier transform. But it made the frequency aliased, too much high frequency side lobe by using the detector to gate disperse image. In order to test the MTF more accurately, we improved the method in two parts by MATLAB simulating, which includes canting slit and smoothing illumination. The curve of relationship between tilted angle and the spectrum value in the canting slit part, and the linear and gauss methods in smoothing illumination part were presented. Simulation results of two improved parts were presented, showing remarkable effects.

**Key words:** slit method; MTF; canted slit; smooth illumination

### 引言

光学系统的调制传递函数(MTF)是评价光学系统尤其是红外光学系统成像质量的重要参数, MTF可以反映系统的衰减, 分辨率等光学特性。在测量MTF的诸多方法中, 狭缝法应用比较普遍。但探测器采集图像的离散特性给测量带来许多麻烦, 在对傅里叶变换频谱进行测量时会出现相邻周期的高低频谱混叠现象以及零级主条纹与相邻周期的次级条纹旁斑相叠加的问题, 从而造成测量值比实际值偏高。因此必须对这两个方面加以限制, 分离开相邻的两个周期的主条纹, 尽量减小次级条纹级数和以及次级条纹的频谱值。

### 1 狭缝法测量原理

将光学系统看做是线性移不变系统, 则有:

$$O(x, y) * h(x, y) = I(x, y) \quad (1)$$

式中:  $O(x, y)$ 是光照函数(被成像物体函数);  $h(x, y)$ 是点扩散函数(即理想点通过系统后在像面上所成的像);  $I(x, y)$ 是物体所成的像;  $*$ 代表卷积。

由于在计算方面卷积的运算比较复杂, 在频率域式(1)的计算就变的较为简单了。在频率域式(1)可以转换为:

$$O(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y) = I(f_x, f_y) \quad (2)$$

式中:  $O(f_x, f_y)$ ,  $H(f_x, f_y)$ ,  $I(f_x, f_y)$ 分别是  $O(x, y)$ ,  $h(x, y)$ ,  $I(x, y)$ 的傅里叶变换;  $(f_x, f_y)$ 是代表  $x$  和  $y$  方向的空间

频率。在光学系统中称  $H(f_x, f_y)$  为光学传递函数 (OTF), OTF 是复数, 调制传递函数<sup>[1]</sup> (MTF) 为 OTF 的模。因此关键是要测量出 OTF。对于狭缝法测调制传递函数的方法来说, 式(2)可以转换为:

$$\text{SLIT}(f_x, f_y) \cdot \text{OTF}(f_x, f_y) = I(f_x, f_y) \quad (3)$$

$$\text{MTF}(f_x, f_y) = |\text{OTF}(f_x, f_y)| = |I(f_x, f_y)| / |\text{SLIT}(f_x, f_y)| \quad (4)$$

式(4)中分母是狭缝的二维傅里叶变换可以通过计算得到, 因此关键是要计算出像方的傅里叶变换  $I(f_x, f_y)$ 。通过探测器采集光学系统所成像, 采集出来的图像是一幅离散的二维图像, 对所采集的图像进行离散傅里叶变换得到  $I(f_x, f_y)$ 。上述为用狭缝法测量光学系统调制传递函数 (MTF) 一般步骤<sup>[2]</sup>。如果光学系统是旋转对称即各向同性的, 这样做就已经完成了 MTF 的测量, 但是如果系统是非旋转对称或各向异性的则必须旋转光学系统量不同方向上的 MTF。

下面使用 MATLAB 对狭缝法进行模拟。狭缝法的关键是得到光学系统所成像的傅里叶变换。像面上的狭缝像为狭缝形状, 可以用矩形形状来代替。矩形的定义原理图如图 1(a)所示, 探测器边长为 size, 矩形狭缝倾斜角度为 theta, 过图像上任意一点  $(i, j)$  向矩形的对称轴线作垂线, 垂足为  $(x, y)$ , 倘若  $(x, y)$  到中心的距离小于矩形长度 length 的一半, 且  $(i, j)$  到  $(x, y)$  的距离小于狭缝宽度 width 的一般, 则将该点的值赋值为 1, 否则为 0。注意这里之所以取宽度 (width) 是 1 个像素是为了使图像更加简洁更容易说明问题, 如果宽度 (width) 取多个像素会造成图像非常复杂。

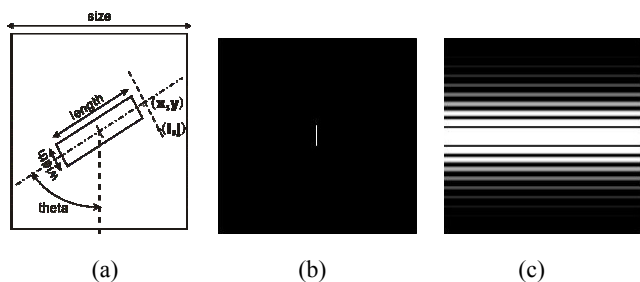


图1 狭缝及其频谱图

Fig.1 Slit and spectrum

取 theta 为  $0^\circ$  时, 所生成的矩形为竖直的狭缝如图 1(b)所示, 通过对该图像进行二维快速傅里叶变换<sup>[3,4]</sup> (fft2) 得到其频谱图如图 1(c)所示, 为了更清晰的查看频谱图, 需要增加图像的对比度, 这里采用对频谱图取对数的方法来提高对比度。在采样图像中设水平方向为  $X$  方向, 垂直方向为  $Y$  方向, 对应的在频谱图中, 水平方向为  $f_x$  方向, 垂直方向为  $f_y$  方向。测量时保证  $f_y=0$ , 即沿着主条纹的脊线方向测量频谱值。整幅频谱图对应的频率宽度为等于采样频率的大小, 各个点对应的频率与该点到中心点的距离成比

例。这样式(4)可以简化为一维函数:

$$\text{MTF}(f) = |I(f)| / |\text{SLIT}(f)| = |I(f)| / [w \cdot |\text{sinc}(wf)|] \quad (5)$$

式中:  $w$ 、 $l$  分别为狭缝的宽度和长度。

前面所讲述的原理是基于连续函数的傅里叶变换, 然而图像在实际的测量中是由探测器对图像进行采样得到的, 为离散的图像。由 MATLAB 求解出来的频谱图只是一个周期的频谱, 根据式(6)所示采样函数傅里叶变换的性质, 可以知道采样图像的傅里叶频谱图应为连续函数频谱图在  $f_x$  和  $f_y$  方向上的周期延拓<sup>[4,5]</sup>:

$$F_s(f) = f_s^2 \sum_n F(f - n f_s) \quad (6)$$

式中:  $F(f)$  为连续函数的傅里叶变换,  $f=(f_x, f_y)$ ,  $f_s=1/\Delta$  是采样频率 ( $\Delta$  是像素大小)。正是由于采样图像傅里叶变换的这一性质, 从而导致了, 在  $f_N=f_s/2$  ( $f_N$  为奈奎斯特采样频率) 附近相邻两个周期的频谱重叠, 第一个周期的高频部分与第二周期的低频部分叠加造成混频现象, 从而造成在奈奎斯特采样频率附近的测量值比实际值偏高。

## 2 倾斜狭缝

由于采样图像频谱的周期延拓造成了在奈奎斯特采样频率附近高频和低频部分的混频。因此必须将混频部分的高低频分开。狭缝倾斜<sup>[5-7]</sup>恰好提供了这样的可能性。根据傅里叶变换<sup>[8]</sup>的性质, 将空间域的图像旋转一定角度, 其频谱也对应的朝相同方向旋转相同的角度。将 MATLAB 程序中 theta 设为  $17^\circ$ , 运行结果如图 2 所示。

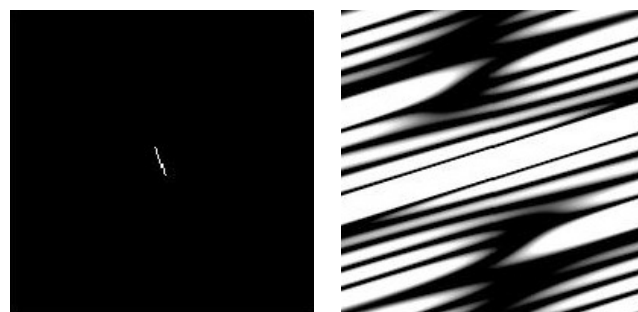


图2 倾斜狭缝和傅里叶变换图

Fig.2 Canted slit and Fourier transform



图3 频谱延拓

Fig.3 Spectrum spread

将 MATLAB 模拟出来的频谱图沿着水平方向进行拼接, 如图 3 所示, 从图上很容易看出, 前一周期

的高频部分(椭圆标示部分)和后一周期的低频部分(矩形标示部分)已经完全分开了。随着倾斜角度的增加,两部分分开的距离越大,在奈奎斯特频率( $f_N$ )处的测量值也随之减小,从而更加接近于实际值。注意到并不是角度越大越好,采样图像的频谱的周期延拓不仅仅沿着水平方向,在竖直方向上也是同样的周期延拓,这样如果旋转 $45^\circ$ 的时候,一个周期的主条纹就和右上角的主条纹在同一直线上,这样两个周期的频谱也会出现混淆现象,因此旋转的角度应该在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间,而且旋转角度不能太小,太小主条纹无法彻底分开。理想的旋转角度为 $15^\circ \sim 20^\circ$ 之间。这里对不同旋转角度的测量结果进行一次比较,取 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内抽取若干个角度的频谱,测量其在 $f_N$ 处的频谱值,对采集到的数据进行4次多项式拟合得到旋转角度 $\theta$ 和频谱值 $V$ 之间的关系曲线如图4所示。

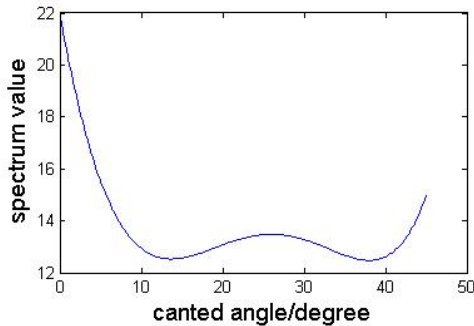


图4 倾斜角度与频谱值关系曲线

Fig.4 Relation curve between canted angle and spectrum value

从图4可以看出在 $0^\circ$ 时 $f_N$ 处频谱值为22,当倾斜 $10^\circ$ 时 $f_N$ 处对应值急剧下降至13左右,这是因为狭缝倾斜致使 $f_N$ 处的高低频谱分开从而导致测量值的降低更加接近实际值。

### 3 平滑照明

倾斜狭缝法虽然把不同周期的主条纹错开,但是从图中可以看到在主条纹旁边还有很多次级条纹存在,这样不可避免的要存在次级条纹和另一周期的主条纹重叠。图5右图是沿左图中的直线测量的频谱值的曲线,从曲线中看到上一周期的高频部分(红圈),淹没在后一周期的旁瓣中,从而导致高频部分测量值比实际值偏大。

前面讨论在均匀照明的情况下进行的,根据狭缝的傅里叶变换频谱式(7)可以得到旁瓣主要是由 $\text{sinc}(lf_y)$ 决定,前面讨论在均匀照明的情况下进行的,根据狭缝的傅里叶变换频谱式(7)可以得到旁瓣主要

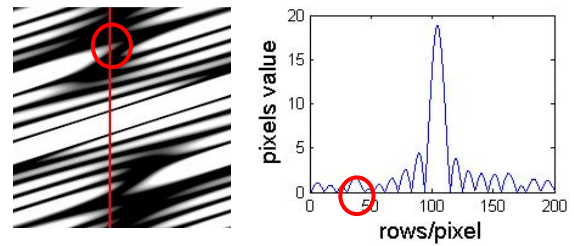


图5 沿直线的频谱分布

Fig.5 Spectrum value along the line

是由 $\text{sinc}(lf_y)$ 决定,必须想办法降低或消除高频部分的频谱值。必须想办法降低或消除高频部分的频谱值。

$$\text{SLIT}(f_x, f_y) = w_l \cdot \text{sinc}(w_f x) \text{sinc}(lf_y) \quad (7)$$

高频的出现主要是由于光强的急聚变换所致,在均匀照明的情况下,在沿狭缝方向上的光强分布为矩形函数,在狭缝端点边沿处有一个光强的骤变,因此造成了过多高频的旁瓣的出现。为了减少这些旁瓣必须使得边沿的光强变化变的平滑。这里提供两种平滑方式,一种为线性递减,另外一种为类高斯递减。

如若沿狭缝方向的光照为线性递减如图6(a)所示,其傅里叶变换频谱式如式(8)所示:

$$T(f) = \frac{\tau}{2} \text{sinc}^2\left(\frac{\tau}{4} f\right) \quad (8)$$

式中: $\tau$ 为三角函数底边长度。次级条纹的按照式(8)函数的方式变换,因为变化是 $\text{sinc}$ 函数的平方关系,因此衰减相当迅速。经过傅里叶变换后的频谱图如图6(c)所示,从图中看出主条纹两侧的旁瓣急剧衰减。如果沿狭缝方向的照明是按照高斯函数(式(9))递减,曲线如图6(b)所示。

$$g(y/a) = e^{-\pi(y/a)^2} \quad (9)$$

注意在高斯函数中参数 $a$ 的选择不能太小,否则会造成狭缝衰减过快,致使狭缝太短。也不能过大,过大会造成在边沿处光强太大仍旧会有光强的骤变,达不到递减的效果。应根据所选狭缝的长度恰当选择。众所周知,高斯函数的傅里叶变化还是高斯函数,傅里叶变换式如下式所示:

$$G(f) = a^2 e^{-\pi(af)^2} \quad (10)$$

由高斯曲线可以看出高斯函数是不会有次级条纹出现的。经过傅里叶变换后的频谱图如图6(d)所示,可以看出旁瓣完全消失。沿图6(d)所示红线测量频谱值得到频谱值曲线如图7所示,从图中可以看出,前一周期的部分(椭圆标注部分)现在清晰可见,从而使得高频部分的测量更加接近于实际值。

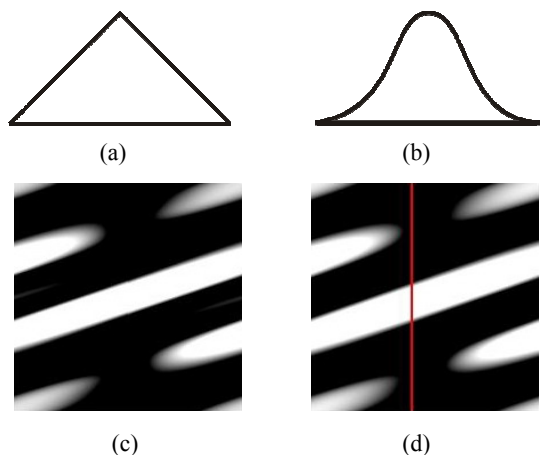


图6 平滑照明曲线及频谱

Fig.6 Smoothing illumination and spectrum

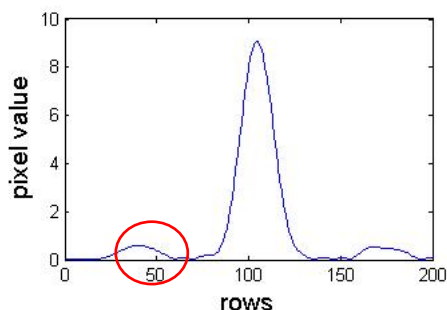


图7 高斯照明下的频谱分布

Fig.7 Spectrum under Gauss illumination

## 4 结论

狭缝法测量光学系统 MTF 由于探测器对成像采样的离散特性造成其频谱的相互叠加<sup>[9]</sup>, MATLAB 模拟结果表明倾斜狭缝的方法可成功的将相邻周期的频谱分离, 在  $0^\circ \sim 20^\circ$  范围内随着角度的增加频谱测量值逐渐减小, 更加接近与实际值。在均匀照明的情况

况下由于狭缝两端的光强的骤变造成高级频谱过多出现, MATLAB 模拟结果表明采用线性衰减照明可以迅速的衰减高级频谱, 次级条纹只在低频率范围内出现。高斯照明则可以完全消除次级条纹的存在, 但同时也必须看到高斯照明的实现难度。文章用 MATLAB 对两部分改进做了模拟。由于对狭缝的定义方法和选择参数不同, 可能模拟结果有所不同, 但是大体趋势不会改变。

## 参考文献:

- [1] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统(下) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [2] M.A.Chambliss, J.A.Dawson, E.J.Borg. Measuring the MTF of Undersampled Staring IRFPA Sensors Using 2D Discrete Fourier Transform[C]//SPIE, 1995, **2470**: 312-324.
- [3] 王爱玲, 叶明生, 邓秋香. MATLAB R2007 图像处理技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 55-62.
- [4] 古德曼. 傅里叶光学导论(三) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 3-23.
- [5] Jeffrey T.Olson, Richard L.Espinola, Eddie L.Jacobs. Comparison of tilted slit and tilted edge superresolution modulation transfer function techniques[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(1): 016403.
- [6] 房红兵. 凝视成像系统 MTF 测试技术研究[J]. 红外与毫米波学报, 1998, **17**(2): 124-128.
- [7] Colin Nichols, Paul Bryant, Chris Alexay. Advances in Infrared Lens Characterization: Measurement of MTF Using Common Undersampled IR Systems[C]. *SPIE*, 2007, **6543**: 654314.
- [8] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-62.
- [9] 马冬梅, 胡明鹏, 孙军月. 凝视型红外光电成像系统主要参数的实验室测评分析[J]. 红外技术, **29**(8): 483-487.

(上接第 520 页)

## 参考文献:

- [1] 李鹏, 肖泽娟, 程惠尔. 空间多层打孔隔热材料热分析数值方法研究[J]. 中国空间科学技术, 2006(5): 17-20.
- [2] 孙培杰, 吴静怡, 张鹏, 等. 层间稀薄气体传热对多层绝热材料性能的影响分析[J]. 低温与超导, 2008, **36**(9): 11-16.
- [3] 肖志宏, 汪荣顺, 石玉美, 等. 应用逐层传热模型分析高真空多层绝热中的传热过程[J]. 真空科学与技术学报, 2004, **24**(2): 113-117.
- [4] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [5] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1991.
- [6] R.西格尔, J.R.豪厄尔. 热辐射传热[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [7] 宁献文, 张加迅, 江海, 等. 倾斜轨道六面体卫星极端外热流解析模型[J]. 宇航学报, 2008, **29**(3): 754-759.
- [8] 张骏, 吕相银, 王一程, 等. 地球辐射对大气层外弹道式目标表面温度场的影响[J]. 红外技术, 2008, **30**(4): 87-91.