

文章编号: 0253-2239(2006)07-1021-6

# 间距对图像传感器调制传递函数矩形模板接触测量的影响

鲁 进 陈伟民 岑军波

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为了简易、方便地测量图像传感器的调制传递函数,可以采用将模板直接投射在图像传感器上的办法来测量。实际测试中通常采用矩形模板,而且模板距离图像传感器光敏面有一定距离。从理论上分析了矩形模板和图像传感器光敏面不同间距情况下的光场分布,比较了用此光场分布函数测量图像传感器调制传递函数与采用正弦模板接触式测量法测得的调制传递函数值之间的差异。最后采用空间频率为  $50 \text{ mm}^{-1}$  的高对比矩形光栅进行了实验,测得调制传递函数为 0.22,而修正后的调制传递函数值为 0.18。结果表明修正后的调制传递函数值更准确,能更准确地评价图像传感器的性能。

**关键词:** 应用光学; 调制传递函数; 间距影响; 矩形模板

中图分类号: O439 文献标识码: A

## Effect of Distance on Modulation Transfer Function of Imaging Sensor Using Rectangle Template Contact Method

Lu Jin Chen Weimin Cen Junbo

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract:** In order to measure the modulation transfer function of the imaging sensor simply and expediently, the method with the template directly projecting on the imaging sensor has been adopted. Usually, the rectangle template is adopted, and there is a distance between the template and the photosensitive surface, which is critical in the measurement. The optical distribution on the rectangle template and the photosensitive surface with different distances are theoretically analyzed. Modulation transfer functions are derived with the optical distribution function and the sine template contact measurement respectively and compared. The experiment has been carried out, using rectangular grating with the spatial frequency  $50 \text{ mm}^{-1}$ , and the experimental value of the modulation transfer function is 0.22, which is corrected to be 0.18. The result indicates that this modified modulation transfer function is more accurate, and the performance of the imaging sensor can be appraised more correctly.

**Key words:** applied optics; modulation transfer function; effect of distance; rectangle template

## 1 引 言

调制传递函数是评价图像传感器成像质量的一个重要指标,它表征了图像传感器分辨明暗细节的能力<sup>[1~3]</sup>。目前图像传感器调制传递函数的测量方法归纳起来主要有两大类,第一类方法需要利用光学系统将靶标函数引入图像传感器像面,第二类方

法则不需要引入光学系统,而是将光强按一定空间分布的输入函数直接通过图像传感器成像,从而产生灰度按一定分布的输出函数图像,通过计算即可求出图像传感器的调制传递函数。目前第二类方法对调制传递函数的测量主要有散斑法和干涉条纹投射法<sup>[4,5]</sup>。它们均不会引入附加光学系统的调制传

作者简介: 鲁 进(1980~),女,重庆人,重庆大学光电工程学院硕士研究生,主要从事数码影像技术的研究。

E-mail: cqulujin@126.com

导师简介: 陈伟民(1955~),男,云南人,博士,重庆大学教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光电技术及系统的研究。

E-mail: wmchen@cqu.edu.cn

收稿日期: 2005-08-25; 收到修改稿日期: 2005-10-09

递函数,而且图像传感器的调制传递函数是在整个像面上获得,但是散斑法数据处理非常复杂,干涉条纹投射法虽然解决了散斑法数据处理复杂的缺点,但是要比较精确地控制输入函数的空间频率。模板接触式测量法通过模板和图像传感器光敏面直接接触,将模板投射到图像传感器的光敏面上,无需光学系统,因而具有方法简单、精度高、可重复性好等优点,在图像传感器的像质评价中具有非常大的应用前景。

由于矩形模板的制作比较简单,实验中通常采用矩形模板接触式测量法。但是,由于图像传感器的光敏面上通常有一层很薄的保护玻璃,这使得矩形模板和图像传感器光敏面之间有一定间距。在间距存在的情况下进行图像传感器调制传递函数的测量,测得值与矩形模板接触式测量法的测得值之间必定存在差异。因此,只有通过分析计算,找出二者之间的差异,才能准确评价图像传感器的成像质量。

## 2 矩形模板接触式测量法的基本原理

测量图像传感器调制传递函数的传统方法是通过光学镜头将靶标成像到图像传感器的光敏面上。由于光学镜头调制传递函数的影响,测得的调制传递函数偏低。为了减小光学镜头的影响,采用将模板直接投射到图像传感器上的方法,如图 1 所示。

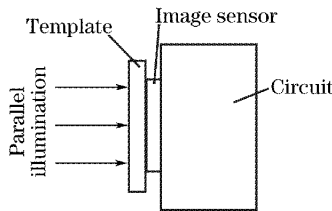


图 1 模板接触式测量法的原理示意图

Fig. 1 Schematic of contact measurement method using template

在实际测试中,通常采用高衬比度的矩形光栅作为矩形模板。设矩形光栅的周期为  $2d$  (光栅每毫米的线数  $l$  和周期  $2d$  的关系为  $l = 1/d$ ), 则矩形光栅透过的能量沿光栅栅距方向的分布(只考虑一维情况时)可以用函数  $O(x)$  表示为<sup>[6]</sup>

$$O(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \cdot \exp\left(i2\pi \frac{n}{2d}x\right), \quad (1)$$

式中  $C_n = \sin(0.5n)/2$  为傅里叶系数,表示各平面波分量的相对振幅和位相分布。

采用图 1 所示的装置,将矩形光栅紧贴图像传感器放置,在平行光照明的情况下,输入函数为矩形

函数  $O(x)$ 。但由于标准的系统调制传递函数测试是采用透过率按正弦曲线变化的正弦靶标进行的<sup>[7]</sup>,为了准确地测量图像传感器的调制传递函数,通常是将矩形函数  $O(x)$  分解为余弦基元的加权组合<sup>[7]</sup>

$$O(x) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \left[ \cos\left(2\pi \frac{1}{2d}x\right) - \frac{1}{3} \left[ \cos\left(2\pi \frac{3}{2d}x\right) \right] + \frac{1}{5} \left[ \cos\left(2\pi \frac{5}{2d}x\right) \right] \cdots \right\}, \quad (2)$$

若忽略高频分量的影响,只讨论空间频率为  $1/(2d)$  的余弦基元,则有

$$O(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4}{\pi} \cos\left(2\pi \frac{1}{2d}x\right) \right]. \quad (3)$$

图像传感器作为光能量接收器件,需要对照射到像元上的光能量进行积分。设余弦基元函数和图像传感器像元的空间关系如图 2 所示(在这种空间关系下能得到最大的调制传递系数),设图像传感器像元的长度为  $a$ ,余弦基元  $O(x)$  的一个周期在图像传感器上占有的像元数为  $m$  (为了便于计算,通常在测量时选择  $m$  为偶数的光栅),则有

$$\frac{1}{2d} = \frac{1}{am}. \quad (4)$$

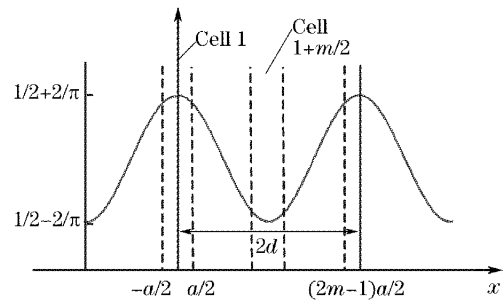


图 2 模板和像元的空间关系示意图

Fig. 2 Spatial relationship between template and cell

在第  $n$  个像元上对函数  $O(x)$  进行积分得到能量  $E_n$  (其中  $n = 1, 2, 3, \dots, m$ )

$$E_n = \int_{(2n-3)a/2}^{(2n-1)a/2} O(x) dx = \int_{(2n-3)a/2}^{(2n-1)a/2} \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4}{\pi} \cos\left(2\pi \frac{1}{2d}x\right) \right] dx = \frac{a}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{ma}{2\pi} \cdot 2 \cos\left[\frac{(4n-4)\pi}{2m}\right] \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right). \quad (5)$$

由(5)式可以得到像元对模板函数  $O(x)$  积分的能量极大值  $E_{\max}$  和极小值  $E_{\min}$  为

当  $n = 1$  时

$$E_{\max} = \frac{a}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{ma}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right), \quad (6)$$

当  $n = 1 + m/2$  时

$$E_{\min} = \frac{a}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{ma}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right), \quad (7)$$

根据定义,图像传感器的输出衬比度为

$$C_o = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{m}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right). \quad (8)$$

由于采用的是高衬比度的矩形光栅,即图像传感器的输入衬比度  $C_i \approx 1$ ,则图像传感器的调制传递函数为

$$M = \frac{C_o}{C_i} \approx \frac{4}{\pi} \cdot \frac{ma}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right). \quad (9)$$

### 3 间距对光敏面上光场分布的影响

从前面的分析可以看到,若将矩形模板紧贴图像传感器光敏面进行测量,则输入函数即为矩形函数,通过像元积分,可求得图像传感器的调制传递函数。但是,由于矩形模板和图像传感器的光敏面之间间距的影响,输入到图像传感器光敏面上的光场分布不再是矩形函数。因此,光敏面上的光场分布不能再用  $O(x)$  来表示,其测量原理如图 3 所示。

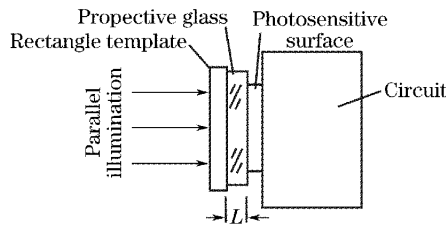


图 3 矩形模板非紧贴测量的原理示意图

Fig. 3 Schematic of noncontact measurement method using rectangle template

设矩形光栅所在平面的直角坐标为  $x_1, y_1$ ,光敏面所在平面的直角坐标为  $x, y$ ,如图 4 所示。

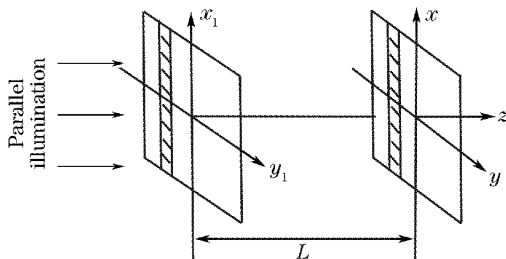


图 4 矩形光栅和光敏面的空间坐标图

Fig. 4 Schematic of spatial coordinate of rectangle grating and photosensitive surface

根据标量衍射理论,菲涅耳近似成立的条件为<sup>[8]</sup>

$$L \gg \frac{1}{8\lambda} [(x - x_1)^2]_{\max}, \quad (10)$$

其中  $L$  为保护玻璃的厚度,  $\max$  表示取最大值。可以看出,一般图像传感器的长为毫米数量级,若采用波长为 600 nm 的单色光,则  $L$  应为几十到上百毫米。而保护玻璃的厚度一般为几百微米,因此,对于整个图像传感器像面来说,并不满足菲涅耳衍射条件。但是,对于矩形光栅的一个狭缝来说(如图 4 所示矩形光栅所在平面  $x_1, y_1$  上的阴影部分),在其图像传感器上对应的直接投影区域(如图 4 所示光敏面所在平面  $x, y$  上的阴影部分),是满足菲涅耳衍射条件的。因此在计算光敏面上的光场分布时可以认为矩形光栅各狭缝的出射光只在图像传感器上对应的直接投影区域产生菲涅耳衍射,在其他位置产生的衍射可以忽略不计。因此,相邻狭缝的出射光互不影响。这样,图像传感器上的光场分布就是各个狭缝在直接投影区域的菲涅耳衍射的简单叠加。

如图 4 所示,采用振幅为  $A$  的单色光平行入射到矩形光栅上,则周期为  $2d$  的矩形光栅后的单个狭缝的复振幅即透过率函数为<sup>[8]</sup>

$$U(x_1) = A \cdot \text{rect}(x_1/d), \quad (11)$$

式中  $\text{rect}$  为矩形函数符号,根据菲涅耳衍射公式,假设入射单色平行光的波长为  $\lambda$ ,则在与矩形光栅相距为  $z$  的位置处的复振幅分布  $U'(x)$  为<sup>[8]</sup>

$$U'(x) = \frac{1}{iz\lambda} \exp\left(\frac{i2\pi z}{\lambda}\right) \times \int U(x_1) \exp\left[\frac{i\pi(x-x_1)^2}{z\lambda}\right] dx_1, \quad (12)$$

将(11)式代入(12)式,有

$$U'(x) = \frac{1}{iz\lambda} \exp\left(\frac{i2\pi z}{\lambda}\right) \times \int A \cdot \text{rect}\left(\frac{x_1}{d}\right) \exp\left[\frac{i\pi(x-x_1)^2}{z\lambda}\right] dx_1, \quad (13)$$

即

$$U'(x) = \frac{1}{iz\lambda} \exp\left(\frac{i2\pi z}{\lambda}\right) \times \int_{-2/d}^{2/d} A \exp\left[\frac{i\pi(x-x_1)^2}{z\lambda}\right] dx_1, \quad (14)$$

引入新的变量<sup>[8]</sup>

$$\xi = \sqrt{\frac{2}{\lambda z}} (x - x_1), \quad (15)$$

定义菲涅耳积分<sup>[8]</sup>

$$C(\alpha) = \int_0^\alpha \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt, \quad S(\alpha) = \int_0^\alpha \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt, \quad (16)$$

因此有<sup>[8]</sup>

$$U'(x) = \frac{A}{i\sqrt{2\lambda z}} \exp\left(\frac{i2\pi z}{\lambda}\right) \times \{ [C(\xi_2) - C(\xi_1)] + i[S(\xi_2) - S(\xi_1)] \}, \quad (17)$$

$$\xi_1 = -\sqrt{\frac{2}{\lambda z}}\left(\frac{d}{2} + x\right), \quad \xi_2 = -\sqrt{\frac{2}{\lambda z}}\left(\frac{d}{2} - x\right), \quad (18)$$

其中

因此,光敏面上的光场强度分布  $O'(x)$  为

$$O'(x) = \frac{A^2}{2\lambda z} \{ [C(\xi_2) - C(\xi_1)]^2 + [S(\xi_2) - S(\xi_1)]^2 \}, \quad x \in [-d, d] \quad (19)$$

将  $O'(x)$  在  $[(2n-1)d, (2n+1)d]$  ( $n$  取自然数) 上进行周期延拓,即可得到图像传感器光敏面上的光场分布。可以看到,  $O'(x)$  与光的波长  $\lambda$ , 光栅到图像传感器光敏面的距离  $z$ , 以及光栅的周期  $2d$  (或每毫米的线数  $l$ ) 有关。图 5 是采用波长为 632.8 nm 的单色平行光源照明周期为 0.04 mm 的矩形光栅时,不同  $z$  时的仿真图形。

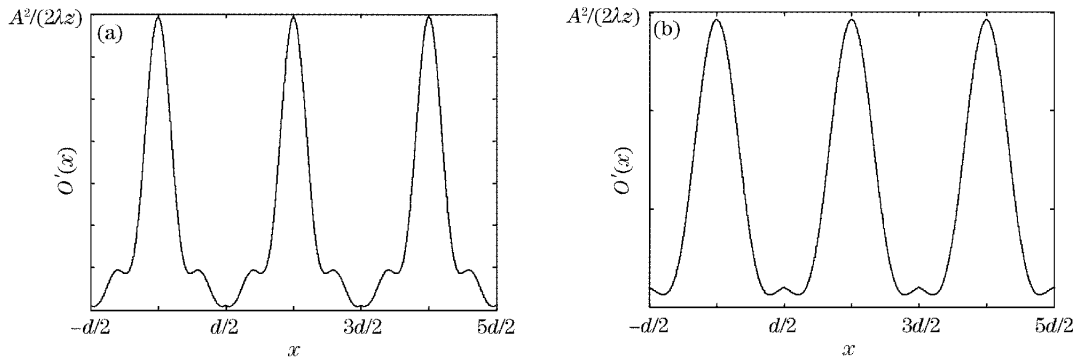


图 5  $z$  为 0.3 mm (a) 和 0.5 mm (b) 时入射到图像传感器光敏面上的光场分布

Fig. 5 Optical field distribution on photosensitive surface when  $z=0.3$  mm (a),  $z=0.5$  mm (b)

#### 4 间距对调制传递数值的影响

通过分析可以看到,当矩形光栅到图像传感器光敏面的距离不为零时,入射到图像传感器上的光场函数即输入函数比较复杂,因此,从图像传感器上输出的响应函数即输出函数仍然是复杂函数。在这种情况下,简单采取直接积分的方法求调制传递函数是行不通的,因为求得图像传感器的输出衬比度不仅包括所需空间频率的正弦函数的衬比度,而且还包含其它频率成分,计算出的调制传递函数将与真实的调制传递函数相差甚远。为此,可将输入函数看成是不同频率的正弦函数的线性组合,通过图像传感器的响应函数也应是这些正弦响应函数的线性组合。若可以提取出输入函数中包含的所需空间频率的正弦函数,同时提取输出函数中相同空间频率的正弦函数,则在此空间频率处的调制传递函数就可以非常简单地求得。

为此,可将入射到图像传感器上的光场分布函数做傅里叶变换,获得其频谱图。根据其频谱就可以得到图像传感器上光场分布的直流和基频分量,若忽略其它频率分量,则可根据直流和基频分量的值得到一个标准的正弦函数。此正弦函数可表示为

$$O'(x) = A' \cdot \left[ k + l \cos\left(2\pi \frac{1}{2d}x\right) \right], \quad (20)$$

式中  $A'$  为系数,  $k$  为入射到光敏面上的光场分布函数在间距存在下直流分量的值,  $l$  为入射到光敏面上的光场分布函数在间距存在下基频分量的幅值(从后面的分析可以看到,最后需要的是  $k$  和  $l$  的比值,因此,  $A'$ 、 $k$ 、 $l$  的具体值就可以不必知道)。

同样设  $O'(x)$  和图像传感器像元的空间关系如图 2 所示,在第  $n$  个像元上对函数  $O''(x)$  进行积分。当  $n = 1$  时可得到能量极大值  $E'_{\max}$

$$E'_{\max} = A' \cdot \left[ k \cdot a + l \cdot \frac{ma}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \right], \quad (21)$$

而当  $n = 1 + m/2$  时,可得到能量极小值  $E'_{\min}$  为

$$E'_{\min} = A' \cdot \left[ k \cdot a - l \cdot \frac{ma}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \right], \quad (22)$$

因此可计算出从图像传感器的输出衬比度为

$$C'_o = \frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}} = \frac{l}{k} \cdot \frac{m}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right). \quad (23)$$

同样采用高衬比度的矩形光栅,即图像传感器的输入衬比度  $C'_i \approx 1$ , 则图像传感器的调制传递函数为

$$M' = \frac{C'_o}{C'_i} = \frac{l}{k} \cdot \frac{m}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right), \quad (24)$$

可以看到,采用矩形模板接触式测量法测量的调制传递函数值可用(9)式表示;而当矩形模板和图像传感器光敏面之间存在一定间距时,调制传递函数值可用(24)式表示。两者的比值为

$$D = \frac{M'}{M} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{l}{k}. \quad (25)$$

## 5 对调制传递函数值的进一步修正

由于标准的系统调制传递函数测试是采用透过率按正弦曲线变化的正弦模板进行的<sup>[7]</sup>,因此,若采用矩形模板接触式测量法,其测得值与采用正弦模板接触式测量法的测得值之间存在差异。由于余弦基元  $O(x)$  的一个周期在图像传感器上占有的像元数  $m$  为偶数个,此时采用矩形模板接触式测量法的调制传递函数测得值  $M$  和采用正弦模板接触式测量法的测得值  $M'$  之间的关系为<sup>[7]</sup>

$$D' = \frac{M}{M'} = \frac{4}{\pi}. \quad (26)$$

因此,采用矩形模板并且当模板和图像传感器光敏面之间存在一定间距时测得的调制传递函数与采用正弦模板接触式测量法测得的调制传递函数值的比值为

$$D'' = \frac{M'}{M''} = D \cdot D' = \frac{l}{k}. \quad (27)$$

因此需将所测得的调制传递函数值根据(27)式进行修正,即图像传感器的调制传递函数值应为

$$M'' = M' \cdot \frac{k}{l}. \quad (28)$$

## 6 实验结果及数据处理

采用高衬比度矩形光栅对图像传感器的调制传递函数进行测试,选取矩形光栅的周期为 0.04 mm,且采用波长为 632.8 nm 的单色平行光源进行照明,图像传感器选用美光 130 万像素的 CMOS 图像传感器,已知其像元的大小为  $5 \mu\text{m}$ (1/2 英寸 130 万像素图像传感器的长为 6.4 mm,且在长度方向上包含 1280 个像素)。矩形模板距图像传感器光敏面的距离为 0.5 mm,图像传感器光敏面上的光场分布如图 5(b)所示。

根据图 5(b)所示的光场分布函数,进行傅里叶变换后,忽略高频分量的影响,可得到标准的余弦函数为

$$O'_{50}(x) = A' \cdot \left[ 1 + 1.2313 \cos\left(2\pi \frac{1}{2d}x\right) \right], \quad (29)$$

比较(20)式和(29)式,有

$$k = 1, \quad l = 1.2313, \quad (30)$$

$$D'' = l/k = 1.2312. \quad (31)$$

由于光栅在制造过程中的缺陷等因素,而且成像过程不可避免地存在噪声,有必要对图像进行去噪处理,以降低噪声对调制传递函数测量的影响。

消除噪声的方法很多,比如低通滤波、邻域平滑等等,但这些方法除了消除噪声信息外还会影响图像的有用信息,给图像带来新的模糊<sup>[9]</sup>。为了不影响图像的有用信息,最直接有效的方法就是求图像沿栅线方向的平均值。而为了更方便地求出平均值,应保证光栅放置时其栅线方向和图像传感器的行(或者列)保持平行。

若光栅的栅线方向和图像传感器的行(或者列)平行,则图像在行(或者列)方向上所有像素的灰度值应大致相等,在像素很多的前提下,随机噪声的均值大致为零。因此可以通过求图像在行(或者列)方向上所有像素灰度的平均值,并对平均后的极大值和极小值再分别求平均值来计算调制传递函数。

矩形光栅像如图 6 所示,对图 6 所示的矩形光栅像在列方向上求灰度的平均值。灰度平均后的矩形光栅像如图 7 所示,求出图 7 所示的灰度极大值的平均值为 178.26,灰度极小值的平均值为 114.81,由于选用的为高衬比度矩形光栅,图像传感器在空间频率为  $50 \text{ mm}^{-1}$  时的调制传递系数为

$$M' = \frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}} = \frac{178.26 - 114.81}{178.26 + 114.81} \approx 0.22.$$

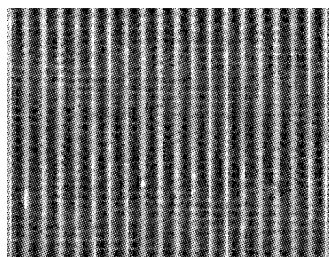


图 6 CMOS 拍摄的矩形光栅

Fig. 6 Image of rectangle grating by CMOS

由(32)式可知,当矩形光栅的线数为  $50 \text{ mm}^{-1}$  时,实际测得的调制传递函数与采用正弦模板接触式测量法测得的调制传递函数值之间的差异为 1.2312,代入(28)式对测得的调制传递函数进行修正,有

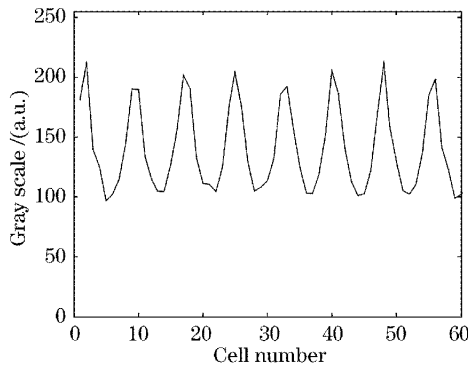


图 7 灰度平均后的矩形光栅

Fig. 7 Averaged gray image of rectangle grating

$$M'' = 0.22 \div 1.2312 \approx 0.18. \quad (33)$$

可以看到,若忽略矩形光栅和图像传感器之间的间距对调制传递函数的影响,测量的相对误差达到 22%,而在一般的测试中相对误差的允许值不能超过 10%。因此必须对测得的图像传感器调制传递函数值进行修正。

## 7 结 论

从理论上计算了采用矩形模板接触式测量法测量调制传递函数的值。根据实际情况,采用衍射理论推导了矩形模板和图像传感器光敏面之间间距不同时光敏面上的光场分布,计算了图像传感器的调制传递函数值。计算结果表明,采用矩形模板接触式测量法的测量值与间距存在时的测量值之间存在一定关系,通过该关系对计算结果进行了修正。最后用  $50 \text{ mm}^{-1}$  的矩形光栅进行了仿真和实验,并根据计算结果对实验结果进行了修正,得到了更为准确的调制传递函数值。

## 参 考 文 献

- 1 Yuan Xianghui. *Solid State Image Sensor and Its Application* [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1992. 1~3 (in Chinese)  
袁祥辉. 固体图像传感器及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1992. 1~3
- 2 Jiang Xiaoguo, Tan Zhao, Li Zeren. The study on the factors effecting CCD modulated transfer function[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 830~833 (in Chinese)  
江孝国, 谭肇, 李泽仁等. 影响 CCD 调制传递函数因素研究[J]. 光子学报, 2003, **32**(7): 830~833
- 3 Zhou Jie, Qiu Shenggen, Liu Xu *et al.*. Measurement system of projection lens based on CCD modulation transfer function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 260~263 (in Chinese)  
周杰, 邱胜根, 刘旭等. 应用 CCD 的投影物镜调制传递函数测量系统[J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 260~263
- 4 Yin Baoquan, Fang Hongbing, Pi Defu. Method for measuring MTF with laser speckle[J]. *Laser and Infrared*, 1997, **27**(3): 173~176 (in Chinese)  
尹宝全, 房红兵, 皮德富. 利用激光散斑进行 MTF 测试技术研究[J]. 激光与红外, 1997, **27**(3): 173~176
- 5 Song Min, Hu Jiasheng, Li Yefang *et al.*. Experimental system for measuring modulation transfer function of CCD[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **26**(4): 327~331 (in Chinese)  
宋敏, 胡家升, 李叶芳等. 测量 CCD 传递函数的实验系统[J]. 中国激光, 1999, **26**(4): 327~331
- 6 Wang Shifan. *Theory and Application of Information Optics* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2004. 59~80  
王仕璠. 信息光学理论与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004. 59~80
- 7 Yang Hua, Jiao Wenchun, Zhu Yonghong *et al.*. Modulation transfer function of CCD camera at Nyquist frequency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 313~316 (in Chinese)  
杨桦, 焦文春, 朱永红等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数[J]. 光学学报, 2002, **22**(3): 313~316
- 8 Huang Wanyun. *Fourier Optics* [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1985. 94~119 (in Chinese)  
黄婉云. 傅立叶光学教程[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985. 94~119
- 9 Wang Wanli, Jiang Xiaoguo, Wu Tinglie *et al.*. Data processing method of measuring CCD imaging MTF with step sample[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2002, **13**(2): 173~175 (in Chinese)  
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