

## 传输型 CCD 相机综合像质评价方法的研究

张晓辉<sup>1</sup>, 韩昌元<sup>1</sup>, 潘玉龙<sup>2</sup>, 韩冰<sup>1</sup>, 金辉<sup>1</sup>

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2.第二炮兵工程设计研究所, 北京 100011)

**摘 要:** 介绍了以 CCD 探测器为图像载体的 CCD 相机整机系统的综合像质评价方法。通过成像理论建模, 分别对光学系统、CCD 器件及相机整机系统进行调制传递函数分析。利用 CCD 器件的“离散采样”特性不满足线性空间不变性的条件, 确定调制传递函数的使用限制条件。给出了 CCD 相机整机系统的调制传递函数测试方案和测试条件, 完成了实验室整系统“调制传递函数”的检测试验, 并对检测结果进行分析与评价, 实现了 CCD 相机整机系统的像质评价。

**关键词:** 离散采样成像系统; 整机; 像质评价

中图分类号: O439 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2008)04-0697-05

## Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera

ZHANG Xiao-hui<sup>1</sup>, HAN Chang-yuan<sup>1</sup>, PAN Yu-long<sup>2</sup>, HAN Bing<sup>1</sup>, JIN Hui<sup>1</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2.Engineering Design Institute of Chinese PLA Second Artillery Corps, Beijing 100011, China)

**Abstract:** Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera was introduced. As the discrete sampling of CCD could not meet space invariability condition, the working restrictive condition was brought forward. Optical system, CCD and complete system of camera were analyzed with the model built by imaging theory. A calculation was done to simulate system MTF for pixel pitch  $\Delta=13$  mm, number of pixels  $N=2\ 048$ . The test scheme and condition of the MTF of the complete CCD camera system was presented. With “contrast technique”, test of the static MTF of complete system in laboratory was finished. The repeat coefficient is less than 0.05 in the test, and the results were analyzed to evaluate the image quality of the complete system of CCD camera. The experimental results demonstrate that the CTF or MTF test for the complete system of CCD camera can evaluate image quality, and precisely calibrate the position of image surface as well.

**Key words:** Discrete sampling image-forming system; Complete camera; Evaluation of image quality

## 0 引言

传输型 CCD 相机是指以 CCD 探测器为图像载体、以成像质量为主要技术指标的光电整机系统。影响其最终成像质量的因素主要包括: 单纯光学系统的

成像质量和 CCD 器件及其后续电路系统对成像质量的影响。针对光学系统的成像质量, 可以利用常规检测方法(如星点检验、分辨率检验等)、干涉检测方法和传递函数对像质进行测试与评价。而对于光电整机系统进行综合像质检测与评价时, 不仅要考虑光学系

收稿日期: 2007-10-02; 修订日期: 2007-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60507003)

作者简介: 张晓辉(1967-), 女, 吉林长春人, 研究员, 硕士, 从事光学检测技术研究和检测设备的研制工作。

Email: zhangxiaohui0123@163.com

统的测试, 更应考虑 CCD 探测器的积分离散采样过程及其自身的电荷转移、扩散等对相机最终成像质量的影响。利用实验室的技术条件进行整机系统的像质评价, 是研制高质量 CCD 相机的重要过程。光学传递函数作为全面、客观评价光学系统成像质量的重要指标, 运用于成像质量评价, 无论是基础理论还是相应的检测技术(包括检测理论、方法和检测设备)都比较成熟。而 CCD 探测器是一种空间离散采样系统, 它并不满足线性空间不变性的条件, 即不符合传递函数的应用条件<sup>[1-4]</sup>。

文中分析了传输型 CCD 相机成像理论, 采用全面、客观的传递函数的方法对传输型 CCD 相机整机系统的像质进行评价。

## 1 理论建模分析

从 CCD 探测器的成像采样过程进行讨论分析, 进而建立 CCD 相机整机的成像质量评价模型。

### 1.1 CCD 探测器的积分离散采样过程分析

CCD 探测器的图像记录过程是 CCD 像元积分离散采样过程, 包含 2 个成像过程: 一是像元积分成像过程, 即每个像元输出信号是与该像元面上的入射光辐射强度的面积成正比; 二是以像元中心距为采样间隔对连续图形目标的离散采样过程。

以面阵 CCD 探测器为例, 针对空间二维积分采样过程, 分析 CCD 探测器的成像过程, 讨论以传递函数来评价其成像过程所必需的条件。

#### 1.1.1 像元积分成像过程分析

通常, CCD 像元接收面为矩形, 以  $\Delta_x, \Delta_y$  分别表示像元在  $x, y$  方向的几何宽度。CCD 像元的积分成像过程可用矩形函数  $\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta_x}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{\Delta_y}\right)$  来表示。

从理论设计和制造工艺上看, CCD 探测器每个像元的采样方式是一致的, CCD 像元的积分成像过程进一步理解为: 单个 CCD 像元在目标函数上连续移动, 图像目标(物函数)与单个像元积分成像相互作用, 形成按像元空间排列的输出图像(像函数), 即 CCD 像元的积分输出图像是由输入图形目标函数与像元成像积分函数的卷积而形成, 可表示为:

$$I(x, y) = A \times O(x, y) * \left[ \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\Delta_y}\right) \right] \quad (1)$$

式中:  $O(x, y)$  表示输入目标图像函数, 称作物函数;  $I(x, y)$  表示 CCD 像元输出图像函数, 称作像函数;  $A$

为放大系数。

公式(1)的物理意义为: 输出图像函数由输入目标图像函数的每一点对其加权迭加积分表示, 这个加权因子取决于像元积分函数。因此, CCD 像元的积分成像过程是一个具有连续输出信号的过程, 满足等晕条件, 具有线性空间不变性, 可利用谐波分析和频谱过滤的观点来评价 CCD 像元的积分成像过程。引入像元积分成像过程的调制传递函数, 对像元面积函数进行傅里叶变换, 并进行零频归一化, 即:

$$\text{MTF}_{\text{积分}}(f_x, f_y) = \frac{\left| \int \int \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\Delta_y}\right) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \right|}{\left| \int \int \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\Delta_y}\right) dx dy \right|} = \text{sinc}(f_x \Delta_x) \text{sinc}(f_y \Delta_y) \quad (2)$$

CCD 像元的  $\text{MTF}_{\text{积分}}$  仅与像元几何尺寸有关, 像元尺寸越小, 其截止频率越高, 截止频率内的  $\text{MTF}_{\text{积分}}$  也越高<sup>[5-8]</sup>。

#### 1.1.2 像元离散采样过程分析

在 CCD 像元积分成像过程的基础上, 以像元中心距为采样间距, 对连续图像进行离散采样。以  $D_x, D_y$  分别表示像元在  $x, y$  方向的像元中心距, 用梳状函数  $\text{comb}\left(\frac{x}{D_x}\right)\text{comb}\left(\frac{y}{D_y}\right)$  表示像元的离散采样过程。

将公式(1)乘以理想梳状函数, 即得到在空域上的 CCD 像元积分离散采样方程:

$$I(x, y) = A \left\{ O(x, y) * \left[ \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\Delta_y}\right) \right] \right\} \times \left[ \text{comb}\left(\frac{x}{D_x}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{D_y}\right) \right] \quad (3)$$

根据离散信号的取样定理可知, CCD 探测器的最高可探测频率为其采样频率的 1/2, 即  $f_N = (2D)^{-1}$ , 称作奈奎斯特频率。目标图像的最高频率大于奈奎斯特频率, CCD 探测器对高频信号的采样记录将产生低频有色噪声, 即欠采样噪声, 将导致图像信号频谱混迭现象, 使低频信号失真。

CCD 探测器离散采样过程不仅与离散采样频率有关, 而且与输入图像信号的相位有关, 尤其是对频率接近  $f_N$  的图像信号, 相位影响更为明显。可见, CCD 像元的离散采样过程不满足线性空间不变性,  $\text{MTF}_{\text{离散}}$  不仅是采样频率的函数, 也是图像信号输入相位的函数,

MTF<sub>离散</sub>(f, φ)。传统意义上的传递函数定义限制了其在 CCD 成像系统中的应用。

CCD 探测器的离散采样周期取决于像元中心距,像元中心距对应的相位周期为[0, 2π]。通常,图像输入信号相对于 CCD 探测器的相位在[0, 2π]区间上服从均匀分布,如果在此区间上对相位进行等概率求平均来计算 MTF<sub>离散</sub>,则 MTF<sub>离散</sub>不再是相位 φ 的函数,只是关于空间频率 f 的函数:

$$\overline{\text{MTF}}_{\text{离散}}(f_x, f_y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{MTF}_{\text{离散}}(f_x, f_y, \varphi_x, \varphi_y) d\varphi_x \right] d\varphi_y \quad (4)$$

针对 CCD 探测器,应用上述分析,采用“对比度法”对同一个 CCD 器件上的不同区域进行调制传递函数测试。用显微物镜将矩形光栅板缩小成像投影到 CCD 器件上,用双频激光干涉仪监测光栅板与 CCD 器件之间的相对移动距离,测得不同相位条件下的 CCD 像元输出调制传递函数,按照相位平均的方法,求出平均调制传递函数。结果表明,同一 CCD 器件不同区域的平均调制传递函数的最大误差仅为 1.7%。

采用“相位平均法”测试 CCD 探测器的调制传递函数对其进行像质评价,解决了因离散采样不满足等晕条件的问题,符合人们采用光学传递函数的观点,可综合评价 CCD 探测器的成像质量。

## 1.2 CCD 相机光电整机系统像质评价分析

对 CCD 相机整机进行像质评价,由于光学系统作为被测系统的组成部分,需要借助平行光管提供无穷目标来测试光路长,影响测量误差的因素较多(包括振动、气流及像元的横向对焦等因素),测试精度难于保证,不易采用上述的方法进行调制传递函数测试。

进一步分析 CCD 探测器的离散采样过程,不难发现 CCD 离散采样过程只与像元中心间距 D<sub>x</sub> 或 D<sub>y</sub> 有关,现代微电子技术及生产工艺的不断提高和发展也使得 CCD 各个像元中心间距一致性非常好。当图像输入到 CCD 探测器表面时,只有在输入信号的空间频率与 CCD 探测器的离散采样频率接近时,相位对输入信号的影响大,而对于较低频输入信号,相位的影响比较小,甚至可以忽略。如果采用限制输入信号位相的方法,在输入图像信号时固定其与 CCD 探测器的位相,忽略 CCD 探测器的欠采样噪声的影响,MTF<sub>离散</sub>可以表示为空间频率的函数关系表达式,再用调制传递函数的方法,完全可以实现 CCD 相机整机

调制传递函数测试。此过程中认为 CCD 像元的几何尺寸与像元中心距相等。

对于 CCD 相机,在不考虑自身及后续电子学系统等对图像信号传输能力的影响时,物面光能量分布为 O(x,y),像的光能量分布为 I(x,y),整机系统的成像关系为:

$$I(x, y) = \left[ O(x, y) * h(x, y) * \left[ \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\Delta_y}\right) \right] \right] \quad (5)$$

式中: h(x,y) 为光学系统的点扩散函数。

对上式进行傅里叶变换,可得到像谱与物谱之间的关系:

$$I(f_x, f_y) = [O(f_x, f_y) * H(f_x, f_y) * \text{sinc}(\Delta_x f_x, \Delta_y f_y)] \quad (6)$$

式中: I(f<sub>x</sub>, f<sub>y</sub>) 和 O(f<sub>x</sub>, f<sub>y</sub>) 分别表示像谱和物谱; H(f<sub>x</sub>, f<sub>y</sub>) 表示光学系统的传递函数; sinc(Δ<sub>x</sub>f<sub>x</sub>, Δ<sub>y</sub>f<sub>y</sub>) 表示 CCD 像元的积分采样所产生的传递函数。

综上所述,在忽略 CCD 器件自身及电子学系统对信号产生影响,即认为电子学信号传递能力为 1:1 的情况下, H(f<sub>x</sub>, f<sub>y</sub>) \* sinc(Δ<sub>x</sub>f<sub>x</sub>, Δ<sub>y</sub>f<sub>y</sub>) 代表整机系统的光学传递函数。

## 2 CCD 相机的 MTF 分析

对 CCD 相机进行 MTF 分析,包括由光学系统的 MTF、CCD 探测器的像元积分离散采样 MTF 及电荷转移和扩散引起的 MTF。

CCD 探测器的像元几何尺寸 Δ=13 μm, f<sub>N</sub>=(2Δ)<sup>-1</sup>=38.5 lp/mm。

光学系统的 MTF 包括衍射受限系统的 MTF<sub>衍射</sub>、光学设计的 MTF<sub>设计</sub> 和光学加工装调引起的 MTF<sub>加工</sub>。

对于非干照明系统,圆形开口的光学系统,其 MTF<sub>衍射</sub> 完全取决于光学系统的 F 数和波长 λ (λ=0.555 μm, F=6)。

$$\text{MTF}_{\text{衍射}}(f) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos\left(\frac{f}{f_0}\right) - \frac{f}{f_0} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \right] \quad (7)$$

式中: f<sub>0</sub>= $\frac{1}{\lambda F}$  300 lp/mm; MTF<sub>衍射</sub>(f<sub>N</sub>)=0.84; MTF<sub>设计</sub>=0.9; MTF<sub>加工</sub>=0.85, 则:

$$\text{MTF}_{\text{光学}} = \text{MTF}_{\text{衍射}} * \text{MTF}_{\text{设计}} * \text{MTF}_{\text{加工}} = 0.64$$

在 MTF 分析中,仅考虑 CCD 探测器的像元积分离散采样 MTF 积分及电荷转移和扩散引起的 MTF。

CCD 探测器的像元积分离散采样为:

$$MTF_{\text{积分}} = \text{FFT} \left[ \text{rect} \left( \frac{x}{\Delta} \right) \right] = \text{sinc}(\Delta \cdot f) = \frac{\sin(\pi \cdot \Delta \cdot f)}{\pi \cdot \Delta \cdot f} \quad (8)$$

当  $f = f_N$  时,  $MTF_{\text{积分}} = 0.64$ 。

电荷转移损失率引入,  $MTF_{\text{转移}} = e^{-2N\varepsilon}$ , 像元数  $N = 2048$ ;  $\varepsilon$  为电荷转移损失率, 当  $\varepsilon = 0.00002$ , 奈奎斯特频率处的  $MTF_{\text{转移}} = 0.9$ 。

CCD 光敏元由于沟阻存在缺陷, 引起像元产生的部分电荷扩散到相邻像元上产生  $MTF_{\text{扩散}}$ 。像元尺寸越小, 扩散长度越大,  $MTF_{\text{扩散}}$  越小; 空间频率越大, 由扩散长度引起的 MTF 下降也越明显, 当制造工艺水平达到扩散长度  $0.65 \mu\text{m}$ , 则  $MTF_{\text{扩散}} = 0.9$ 。MTF<sub>CCD</sub> 的分析结果为:  $MTF_{\text{CCD}} = MTF_{\text{积分}} \times MTF_{\text{转移}} \times MTF_{\text{扩散}} = 0.52$ ; 依据上述分析, 则 CCD 相机的 MTF 结果为  $MTF = MTF_{\text{光学}} \times MTF_{\text{CCD}} = 0.33$ 。

### 3 CCD 相机实验室 MTF 测试

#### 3.1 常用方法选择与分析

针对光学镜头, 多种测试方法可实现其调制传递函数检测, 常用的方法有扫描法、干涉法和比对度法。考虑 CCD 相机整机进行调制传递函数测试不仅有光学镜头, 还包括 CCD 探测器及其后续电子学系统, 必须考虑 CCD 探测器的应用条件。为此, 采用对比度法进行测试。这不仅符合 CCD 探测器这种积分采样系统的调制传递函数的定义, 而且检测系统容易实现。

采用对比度法进行调制传递函数测试, 通常要求以单一空间频率的正弦光栅为目标, 将其置于平行光管焦面处, 作为 CCD 相机的无穷目标。由于正弦光栅的制作加工非常难, 不易保证精度, 通常采用容易制作的矩形光栅替代正弦光栅作目标。两者在频谱分析上是有差别的, 以矩形光栅的调制度对比定义对比传递函数, 用 CTF 表示。按照正弦级数展开的定义, 可将矩形分布函数展开成不同频率的正弦分布的叠加, 可用下式表示:

$$CTF(f) = \frac{4}{\pi} \left[ MTF(f) - \frac{1}{3} MTF(3f) + \frac{1}{5} MTF(5f) - \frac{1}{7} MTF(7f) + \dots \right] \quad (9)$$

CCD 探测器是低通滤波器, 高频部分衰减很快, 最高可测频率为  $f_N$ , 高于  $f_N$  可认为其  $MTF = 0$ ; 从公式 (10) 中可发现, 频率越高其所占比例越小, 可以忽略奇次倍频的影响, CTF 与 MTF 的关系为:

$$MTF(f) = \frac{\pi}{4} [CTF(f)] \quad (10)$$

由 CCD 相机输出的是存储器中的数字视频图像数据, 将其视为 CCD 相机的“光栅目标像”, 对其调制度的测试采用如下的方法: 由微机调用存储器中的数字图像数据, 显示在监视器上, 利用图像测试软件测试“光栅目标”明暗条纹对应的灰度值, 分别用  $I_{\text{max}}$ 、 $I_{\text{min}}$  表示, 则该“光栅目标”的调制度  $M = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}})$ , CCD 整机系统在该频率下的调制传递函数为  $CTF(f) = M(f) / M_0(f)$ ,  $M_0$  为光栅目标的调制度。

调制度的零频归化, 采用  $f_0 = f_N / 128$  作为归一化频率。在光栅目标制作时, 同时将  $f_0$  空间频率的光栅条纹制作在一起, 保证在同一状态下测试。

#### 3.2 测试方案设计

采用对比度法对 CCD 相机实验室 MTF 进行测试试验。测试光路如图 1 所示。

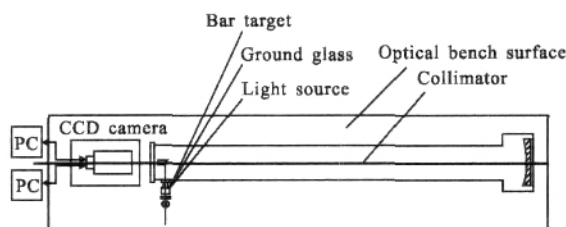


图 1 测试光路图

Fig.1 Sketch map of measurement

测试中注意几个问题: (1) 对平行光管严格定出焦面, 目标光栅准确置于来行光管焦面处, 可用反射镜自准法进行像面定位。(2) 光栅目标的条纹方向与 CCD 探测器的阵列方向垂直, 可通过调整光栅目标的绕光轴旋转来保证。(3) 照明光源采用直流供电, 避免 50 Hz 交流信号的干扰。(4) 测试  $f_N$  下的 CTF 时, 按照前面的分析, 只测试光栅目标像与 CCD 探测器的输入相位差为 0 (即光栅目标像完全覆盖光敏元) 时的 CTF, 通过调整目标光栅与 CCD 的相对位置, 使 CTF 输出值最即可。

#### 3.3 检测结果与分析

在环境温度  $18^\circ\text{C}$ , 相对湿度 55% 的实验室条件下, 按前述设计的检测方案, 实际测试了 CCD 相机的 CTF, 结果如表 1 所示。

表 1 测量数据

Tab.1 Measuring data

Interspace frequencies	CTF
$f_N/8$	0.87
$f_N/4$	0.72
$f_N/2$	0.52
$f_N/1.3$	0.42
$f_N$	0.25



图2为奈奎斯特频率下 CCD 相机的光栅输出图

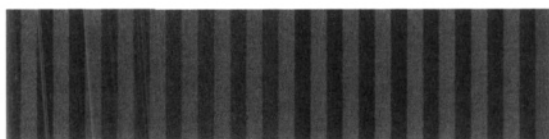


图2 输出图像  
Fig.2 Output image

形。从多次测量结果来看,测试结果的重复性在 0.05 以内,影响测试结果的主要因素有:

(1) 光栅条纹方向与 CCD 像元阵列方向的一致性,包括旋转和焦面离焦等。

(2) CCD 相机传递函数测试时,测试光路长,环境因素对它的影响也很大,要在空气减振平台进行测试,另外测试时的气流抖动也产生一定的影响。

由于平行光管主镜面形误差的影响和上述影响测试结果的其他因素,与 CCD 相机的理论分析结果相比,检测结果略低。由此可见,采用 CTF(或 MTF)测试,可以实现对 CCD 相机整机系统的像质定量检测,根据设计指标,进行系统像质评价,尤其是在 CCD 奈奎斯特频率处的 CTF(或 MTF)测试,可以非常灵敏地检测出相机当前状态下的成像质量。

#### 4 结束语

利用 CCD 相机整机系统的 CTF(或 MTF)测试,不仅可以评价成像质量,还可以精确地进行像面定位标定。利用 CTF(或 MTF)测试方法,在实验室条件下,精确标定出 CCD 相机在对无穷远目标成像时的焦面位置,以此焦面位置为基准,进行外场对月成像试验,获得了非常清晰的月球表面照片。

此外,在对 CCD 相机进行环模试验时,也可利用

此方法,实时检测 CCD 相机整机系统在不同环境条件下的像质情况,应用效果非常明显。

#### 参考文献:

- [1] XU Xiu-zhen, LI Zi-tian, XUE Li-jun. Analysis and processing of CCD noise[J]. Infrared and Laser Engineering(许秀贞,李自田,薛利军.CCD 噪声分析及处理技术.红外与激光工程), 2004, 33(4): 343- 346.
- [2] MIAO Chang-qing, WANG Bo, FU Meng-yin, et al. Real-time image U-adding system for moving targets by CCD[J]. Infrared and Laser Engineering(苗常青,汪渤,付梦印,等.实时 CCD 成像跟踪处理系统研究.红外与激光工程), 2005, 34(3): 310- 313.
- [3] WITTENSTEIN W, FONTANELLA J, NEWBERY A, et al. The definition of the OTF and the measurement of aliasing for sampled imaging system[J]. Opt Acta, 1982, 29(1): 41- 50.
- [4] FELTZ C, KARIM A. Modulation transfer function of charge-coupled devices[J]. Appl Opt, 1990, 29(5): 717- 722.
- [5] ZHANG Yong, ZHAO Da-zun. Optical transfer function for discrete imaging systems[J]. Journal of Beijing Institute of Technology(张勇,赵达尊.离散成像系统的光学传递函数.北京理工大学学报), 1997, 17(2): 151- 155.
- [6] CHI Xue-fen, HAN Chang-yuan. Assessment of sampled imaging system based on information-theory[J]. Optical and Precision Engineering(迟学芬,韩昌元.基于信息理论的采样成像系统评价方法.光学精密工程), 2003, 11(3): 207- 211.
- [7] CHEN Ying-juan, ZHANG Zhi-jiang, ZHANG Zhi-qiang. Correction of CCD pixel nonuniformity[J]. Optical and Precision Engineering(陈迎娟,张之江,张智强.CCD 像素响应不均匀性的校正方法.光学精密工程), 2004, 12(2): 216- 220.
- [8] KE Cai-jun, YI Xin-jian, LAI Jian-jun. Research on microlens array for improving the fill factor of CCD image sensors[J]. Infrared and Laser Engineering(柯才军,易新建,赖建军.提高 CCD 图像传感器填充因子的微透镜阵列的研究.红外与激光工程), 2004, 33(2): 209- 212.