

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0313-04

CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数*

杨 桦 焦文春 朱永红 刘 颖

(北京空间机电研究所,北京 100080)

摘要: 调制传递函数是成像系统性能的重要参数,在进行 CCD 相机调制传递函数测试时,通常采用矩形靶标而非正弦靶标,使调制传递函数的测试值与相机系统实际调制传递函数值存在差异。本文对 CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数测试结果进行了理论分析。

关键词: 奈奎斯特频率;调制传递函数测试;CCD 相机

中图分类号:O439 文献标识码:A

1 引 言

CCD 相机的成像系统主要由光学镜头、CCD 及相关电路这两大部分组成。

线阵 CCD 是一种光电转换部件,由一组大小相同的 CCD 像元在线阵方向上有序排列而构成。CCD 相机的成像实际上是线阵 CCD 诸像元对景物进行空间采样的过程。CCD 像元的几何尺寸决定了相机系统的空间截止频率——奈奎斯特频率。根据理论分析,CCD 在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数极限值为 $2/\pi$,于是,CCD 相机在系统的奈奎斯特频率处的调制传递函数的理论值为

$$F = (2/\pi)H(N), \quad (1)$$

式中, $H(N)$ 为相机光学镜头在奈奎斯特频率处的调制传递函数。

调制传递函数是评价成像系统质量的一个重要指标。本文介绍了利用高对比度矩形靶标,对线阵 CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数进行测试的情况及相应的理论分析。

本文中的理论推导及测试数据,在未作特殊说明时,均是指在相机奈奎斯特频率下的情况。

2 CCD 相机的调制传递函数测试

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。当正弦靶标被均匀照亮时,所透过的光能量在空间的分布可用函数

$O(x)$ 来表示^[1]:

$$O(x) = A_e + A_0[1 + f(x)] = A_e + A_0[1 + \cos(x)], \quad (2)$$

式中, $f(x)$ 为正弦靶标的透过率函数,通常写成余弦形式; A_0 表示光能量按正弦变化时的振幅; A_e 为靶标最小透过光能量, A_e 与 $(2A_0 + A_e)$ 的比值为靶标的透过对比度。此时,成像的输入调制度为

$$M_{in} = A_0 / (A_0 + A_e). \quad (3)$$

正弦靶标经相机镜头成像后,在镜头像面上分布的像函数 $i(x)$ 为

$$i(x) = A_e + A_0[1 + H(N)\cos(x)], \quad (4)$$

(4) 式中, $H(N)$ 表示为相机镜头在空间频率 N 处的调制传递函数。

在相机成像时,CCD 作为光电转换器件,被安置于相机镜头的像面处对像函数 $i(x)$ 进行接收。设 CCD 像元的宽度为 d ,则像元的成像就是在空间域内对像函数 $i(x)$ 进行能量积分的过程。

在消除了靶标与像元之间因相对位置而产生的相位偏差的影响后,对于奈奎斯特频率,靶标的像函数 $i(x)$ 与像元的空间关系如图 1 所示。

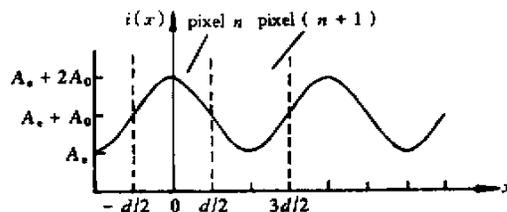


Fig.1 Schematic diagram of spatial relation between target image function and pixels in Nyquist frequency

由图 1,两个相邻的像元 n 和像元 $n+1$ 对 $i(x)$ 分别积分得到能量最大值 E_{max} 与最小值 E_{min} :

* 国防科技预研基金(J20.19.1)资助课题。

E-mail: bisme@public3.bta.net.cn

收稿日期: 2001-03-05; 收到修改稿日期: 2001-05-04

$$E_{\max} = \int_{-d/2}^{d/2} i(x) dx = A_e d + A_0 \left[d + H(N) \int_{-d/2}^{d/2} \cos(2\pi N x) dx \right] = \left\{ A_e + A_0 \left[1 + \frac{2}{\pi} H(N) \right] \right\} d, \quad (5)$$

$$E_{\min} = \int_{d/2}^{3d/2} i(x) dx = A_e d + A_0 \left[d + H(N) \int_{d/2}^{3d/2} \cos(2\pi N x) dx \right] = \left\{ A_e + A_0 \left[1 - \frac{2}{\pi} H(N) \right] \right\} d. \quad (6)$$

通常认为 CCD 像元的输出响应信号 V_E 与像元通过空间积分所接收的能量(照度)存在着如式(7)所示的线性关系^[2]:

$$V_E = kE + V_B, \quad (7)$$

式中, V_E 为 CCD 像元的输出信号, E 为像元接收的能量(照度), k 为斜率, V_B 为截距。

当 $V_B = 0$ 时, 由(5)式、(6)式、(7)式计算得到的相机系统输出调制度如(8)式所示:

$$M_{\text{out}} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} = \frac{A_0}{A_0 + A_e} \frac{2}{\pi} H(N). \quad (8)$$

式中 V_{\max} 、 V_{\min} 分别为两相邻像元接收的能量 E_{\max} 、 E_{\min} 对应的输出信号值。根据调制传递函数的定义, 相机系统的调制传递函数理论值为

$$F = \frac{M_{\text{out}}}{M_{\text{in}}} = \frac{2}{\pi} H(N). \quad (9)$$

若改用高对比度矩形靶标对相机系统进行调制传递函数测试, 则(2)式中的函数 $f(x)$ 为矩形函数, 而不再是正弦函数。对于这个矩形函数, 可以将其看作是由无数个正弦函数叠加而成的, 则函数 $\alpha(x)$ 和 $i(x)$ 可以在基频 N 处分别展开为^[1]

$$\alpha(x) = A_e + A_0 \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \left[\cos(2\pi N x) - \frac{1}{3} \cos 2\pi(3N)x + \frac{1}{5} \cos 2\pi(5N)x \dots \right] \right\}, \quad (10)$$

$$i(x) = A_e + A_0 \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \left[H(N) \cos(2\pi N x) - \frac{1}{3} H(3N) \cos 2\pi(3N)x + \frac{1}{5} H(5N) \cos 2\pi(5N)x \dots \right] \right\}. \quad (11)$$

按照(4)式的处理方式对上式的 $i(x)$ 进行空间积分, 在忽略了高频分量的影响后, 可以得到利用高对比度矩形靶标(有 $A_0 \gg A_e$)进行传递函数测试的系统输出调制度 M_0 为

$$M_0 = \frac{A_0}{A_0 + A_e} \frac{4}{\pi} \frac{2}{\pi} H(N) \approx \frac{4}{\pi} \frac{2}{\pi} H(N). \quad (12)$$

比较(8)式和(12)式就会看出, 应用高对比度矩形靶标进行传递函数测试时, 所得出的输出调制度数据与系统真正的调制传递函数数据之间存在着系数 $4/\pi$ 的差异, 在计算 CCD 相机系统实际的调制传递函数时应当予以扣除。

3 CCD 相机调制传递函数的测试

对 CCD 相机调制传递函数的测试, 通常是指对相机在 CCD 线阵方向的静态传递函数进行测试。标准的调制传递函数测试应选用正弦靶标作为目标, 但由于靶标制造工艺的限制, 一般多选用易于制造的矩形靶标来进行测试^[3]。

测试相机调制传递函数的装置如图 2 所示。

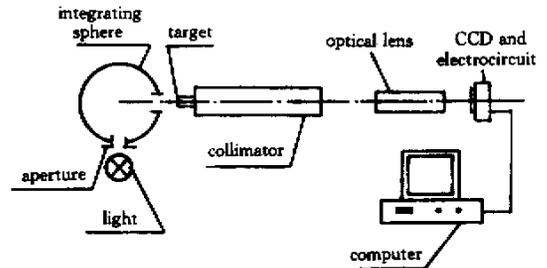


Fig. 2 Schematic diagram of MTF testing system

将高对比矩形靶标安置于平行光管(焦距为 $f_{//}$)的焦面处, 以模拟无穷远的景物目标; 平行光管的光轴经过调整后, 与相机镜头(调制传递函数已知)的光轴共轴。线阵 CCD 垂直光轴方向安置于相机镜头(焦距为 f_L)的后焦点处, 且线阵方向与靶标刻线方向垂直。高对比靶标的刻线被积分球的出射光均匀照亮, 经平行光管及相机镜头成像后被 CCD 像元接收, 转换为 CCD 的输出电信号, 再通过相关的电路, 由计算机进行信号采集并予以量化成数字灰度值。

在考察 CCD 的输出响应随目标亮度变化的情况时, 为避免照明的色温曲线发生变化而带来额外的测试误差, 通过调整积分球灯源入射处的入射光阑来改变积分球的输出亮度。

设 CCD 像元的尺寸为 $d \times d$, 则相机系统的空间截止频率 $N = 1/2d$, 矩形靶标的刻线频率与这个频率相对应。

在测试中,随着积分球亮度的改变,CCD 的输出响应也随之变化。CCD 对靶标亮线与暗线的响应 $V_A(E)$ 、 $V_B(E)$ 对应为灰度值,随照明能量(对应为辐射亮度)改变而变化的关系如图 3 所示。

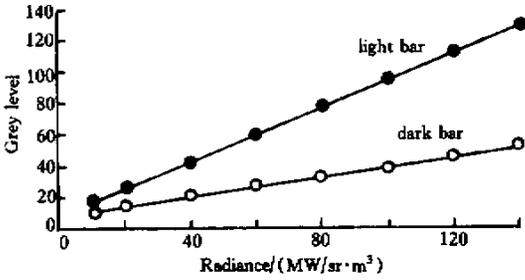


Fig.3 CCD response to target bar

考察 CCD 的响应值与照明能量间存在的线性关系就会发现,对于实际的 CCD 像元输出,在线性关系式(7)中的截距 V_B 并不为 0。

由于常数项 V_B 的存在,对 CCD 相机输出调制度的公式推导就要复杂一些。为便于计算,先考察含有 V_B 时输出调制度 M'_{out} 与 V_B 为 0 时的输出调制度 M_0 的比值,可以得到

$$\frac{M'_{out}}{M_0} = 1 - \frac{V_B}{V_E}, \quad (13)$$

由于 V_B 的影响,导致直接按照 CCD 的响应所计算的输出调制度 M'_{out} 就会形成一条曲线:高照度时,因 $V_E \gg V_B$, V_B 可忽略不计, M'_{out} 近似不变;在低照度时,因 V_E 趋近于 V_B 而使 M'_{out} 迅速减小。

因此,在计算输出调制度之前,必须要在 CCD 的响应中去除常数项 V_B 的影响,才能得到系统真实的输出调制度 M_0 。

4 影响相机系统实际调制传递函数的因素

调制传递函数是评价相机性能的一个重要技术指标,CCD 相机的调制传递函数由光学镜头的调制传递函数与 CCD 的调制传递函数这两大部分组成。

在 CCD 相机的实际研制过程中,光学镜头的调制传递函数主要由镜头设计、光学加工及光学装调等因素的影响,而 CCD 的调制传递函数不仅受空间采样的限制,同时也与 CCD 像元的材料、驱动电路及信号采集电路密切相关^[4]。

因此,CCD 相机在系统空间截止频率——奈奎斯特频率(N)处的实际传递函数应为

$$F = \frac{2}{\pi} \beta_{CCD} \beta_e H(N), \quad (14)$$

(14)式中, β_{CCD} 为 CCD 像元的材料、设计及驱动电路等各因素的综合影响系数,且 $0 < \beta_{CCD} \leq 1$; 而 β_e 为 CCD 信号采集及数据传递电路的综合影响系数,且 $0 < \beta_e \leq 1$; $H(N)$ 为相机镜头在此空间频率处的实际传递函数数值。

当 CCD 的设计及生产工艺较为得当,像元间彼此没有串扰,电荷转移效率较高时, β_{CCD} 趋近于 1, β_{CCD} 对系统调制传递函数的影响较小。同样地,当信号采集及数据传递电路的信噪比较高时, β_e 趋近于 1, β_e 对系统调制传递函数的影响也会变得很小。此时,相机系统的传递函数值就会接近理论值。

由此可见,在相机总体设计时,不仅要考虑到光学镜头的传递函数,同时也需要对 CCD 的选择及相关电路的设计给予高度重视,以利于提高系统整体的传递函数。

在用高对比正弦靶测试相机系统调制传递函数时,物方调制度可以近似看作 1,则系统的输出调制度在数值上就等于系统调制传递函数。而采用矩形靶标后,根据前面(12)式的分析,系统输出调制度 M_0 与系统调制传递函数之间在数值上则存在着 $4/\pi$ 的倍数关系。因此,对于矩形靶标成像测试,CCD 相机系统的传递函数为

$$F = \frac{\pi}{4} M_0. \quad (15)$$

将(14)式与(15)式联立,则有

$$\beta_{CCD} \beta_e H(N) = \frac{\pi^2}{8} M_0. \quad (16)$$

根据(16)式,当知道 $H(N)$ 时,测试数据 M_0 反映了实际 CCD 及其电路部分对相机系统调制传递函数的综合影响(β_{CCD} 与 β_e 的乘积);而当选用了性能较好的 CCD 及相关电路时(β_{CCD} 与 β_e 都接近于 1), M_0 实际上与相机镜头的传递函数密切相关。

另外,根据前(13)式的分析,在 CCD 的响应中还包含着常数项 V_B 的影响,在计算相机系统的实际输出调制度时必须予以考虑。

表 1 给出了实验得到的有关数据。

Table 1. Experimental data

$H(N)$ (tested)	M_0 (tested)	$(\pi^2/8)M_0$ [$= \beta_{CCD} \beta_e H(N)$] calculated)
0.60	0.46	0.58

从上表可以看出,光学镜头 $H(N)$ 的实测值为

0.60,根据实验测试的系统输出调制度值以及(16)式计算得到:镜头及电路影响系数之积为0.58,两者基本相同,说明实验结果与理论推导相符,并且实验所用电路性能优良,对系统调制传递函数的影响系数约为 $0.58/0.60 \approx 0.97$,接近于1。

结论 进行 CCD 相机的调制传递函数测试时,采用正弦靶标可以得到真正意义上的调制传递函数。但是正弦靶标制造难度大,精度不易保证,因此在实际过程中通常采用矩形靶标。应当注意的是,在奈奎斯特频率处,采用矩形靶标得到的输出调制度数据与采用正弦靶标得到的数据之间存在系数 $4/\pi$ 的差异,在计算 CCD 相机系统实际的调制传递函数时应当予以扣除。同时,计算相机系统输出调制度时应去除 CCD 输出响应的常数项的影响。此外,通过成像实验,可以根据已知光学系统的调制传递函数确定成像电路性能,也可以采用相同的成像电路确定

不同光学系统的调制传递函数。

参 考 文 献

- [1] Li Jianbai. Image Quality Evaluation with Optical Transfer Function. In Jiang Zhuying, Li Jianbai, Xiang Caixin *et al.* ed. *Corpus of Optical System Image Quality Evaluation and Test* (光学系统成像质量评价及检验文集). Beijing: Chinese Metrology Press, 1988. 86~103 (in Chinese)
- [2] Xiang Shiming, Ni Guoqiang. *Principle of Photoelectron Imaging Device*. (光电子成像器件原理). Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 70~78 (in Chinese)
- [3] Feltz J C. Development of the modulation transfer function and contrast transfer function for discrete systems, particularly charge-coupled devices. *Opt. Engng.*, 1990, 29(8): 893~904
- [4] Liu Ying, Xu Rongfu, Liu Jinghai *et al.* Principle, characteristic, and application of CCD imaging device. *Opt. Technol. Supplement* (光学技术), 1993. 54~56 (in Chinese)

Modulation Transfer Function of CCD Camera at Nyquist Frequency

Yang Hua Jiao Wenchun Zhu Yonghong Liu Ying

(Beijing Institute of Space Machine and Electricity, Beijing 100080)

(Received 5 March 2001; revised 4 May 2001)

Abstract: The modulation transfer function (MTF) is an important parameter indicating the performance of an imaging system. While in the testing of MTF of CCD camera, there is often a difference between test value and actual value of MTF due to the use of a rectangular bar target rather than a sinusoidal bar target. The MTF test result at Nyquist frequency of CCD camera system is theoretically analyzed.

Key words: Nyquist frequency; modulation transfer function test; CCD camera