

用方波对比传递函数评价 CCD 像 传感器图像输出信号的像质

仲思东 郑琳

(武汉测绘科技大学光电工程学院, 武汉市珞喻路 39号, 430070)

摘要 提出了用方波对比传递函数 CTF 评价 CCD 像传感器像质的方法, 给出了计算 CCD 像传感器方波对比传递函数 CTF 的公式, 并着重分析讨论了 CCD 像传感器的离散性对像质的影响。实验表明, 理论分析结果与实验数据基本符合, 为更精确地进行 CCD 及其它离散器件的系统设计提供了理论依据。

关键词 CCD 像传感器; 方波对比传递函数; 像质评价

分类号 TP212

基于调制传递函数 (MTF) 理论^[1,2], 定量地给出 CCD 的 MTF 值。由于 CCD 的结构并不完全满足空间不变性这一要求, 因而用传统的 MTF 理论来评价 CCD 的成像质量是不够严密的。在文献 [3] 中指出了即使对同一输入频率 (正弦信号), 在相对于 CCD 的像元处于不同位置时, 其 MTF 值是在某一范围内变化的。然而想要建立一个按正弦规律变化的图像信号作为输入信号并不是一件容易办到的事情, 而建立一个方波作为输入图像要容易得多。在 CCD 的应用中也常遇到诸如边缘提取、刻线对准、条码识别等输入为方波信号的问题。因此建立用对比传递函数 CTF 来评价 CCD 的成像质量便成为一项十分有意义的工作。

1 用对比传递函数评价 CCD 像质数学模型的建立

对一线阵 CCD 器件, 当入射图像的光强分布函数为:

$$I(x) = \begin{cases} 1 & [-\pi/2 + 2n\pi, \pi/2 + 2n\pi] \\ 0 & [\pi/2 + 2n\pi, 3\pi/2 + 2n\pi] \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

则输入光信号的对比度为:

$$c = (1 - 0) / (1 + 0) = 1 \quad (2)$$

我们在矩形信号的某一周期内讨论。为便于讨论, 所有线量皆转化为角量。令光强分布的周期为 2π , 在此周期内 T 为 CCD 像元的宽度值; U 为 CCD 相邻像元间距; j_H 为亮条纹中心到离它最近的光敏元中心的距离, 光敏元中心在右时取正值, 反之取负值; n 为输入函数的半周期所跨越的像元数。当 $j_L = \pm U/2$ 时, 即暗条纹中心与相邻二像元中心的平均位置相重合, 令 $j_H = j_H^*$, 则

$$j_H^* = \pi - (n - 0.5)U \quad (3)$$

$$K = \begin{cases} n & j_H < j_H^* \\ n - 1 & j_H > j_H^* \end{cases} \quad (4)$$

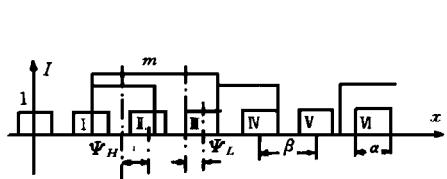
取

显然,这两个光敏元在此周期内有最亮和最暗的响应。设它们分别为 B_{\max} 和 B_{\min} , 则 CCD 响应的对比度为:

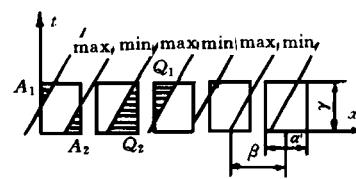
$$c' = (B_{\max} - B_{\min}) / (B_{\max} + B_{\min}) \quad (5)$$

CCD 的方波对比传递函数为:

$$CTF = c' / c = c' = (B_{\max} - B_{\min}) / (B_{\max} + B_{\min}) \quad (6)$$



1



冬 2

1.1 输入为静态方波情况

对于输入的矩形波,求解 CTF 的关键在于积分限的选取。确定积分限的目的是要在输入矩形波的某一周期内找出哪一个像元对应响应的最大值,哪一个像元对应响应的最小值。如图 1 在输入矩形波的第 M 周期上,II 像元对应输出最大值,III 像元对应输出最小值。 B_{\max} 积分限选取如下:1) 矩形波左侧 $-\pi/2$ 和感光最亮光敏元左侧 $j_H - T/2$ 中较大者作为 B_{\max} 的积分下限,即 B_{\max} 下限为 $\max(-\pi/2, j_H - T/2)$;2) 矩形波右侧 $\pi/2$ 和感光最亮光敏元右侧 $j_H + T/2$ 中较小者为 B_{\max} 光积分上限,即 B_{\max} 上限为 $\min(\pi/2, j_H + T/2)$ 。所以,

$$B_{\max} = \int_{\max(j_{H^+} - T/2, -\pi/2)}^{\min(j_{H^+} + T/2, \pi/2)} 1 dx \quad (7)$$

同理，

$$B_{\min} = \int_0^T 1 dx - \int_{\max(j_L - T/2\pi, 0)}^{\min(j_L + T/2, k/2)} 1 dx \quad (8)$$

由式(6)即可求得输入为静态方波的对比传递函数 CTE

1.2 输入为动态方波情况

建立动态 CTF的数学模型比静态要复杂得多。如图 2,设 CCD光积分时间 ($-V/2, V/2$) ,方波运动的速度为 v (rad/s) 当方波处于最大值 $\max=1$ 时,方波从时间 $-V/2$ 到 $V/2$ 运动所经过离它最近的光敏元范围,如图 2, \max 包容的未画阴影部分。此时, B_{\max} 应为 $\max=1$ 的波形在 V 时间内并在 T 内的积分减去未被 $\max=1$ 所覆盖的两个阴影区 A_1 和 A_2 ,即

$$B_{\text{max}} \equiv T \cdot V \cdot 1 - A_1 - A_2 \equiv TV - A_1 - A_2 \quad (9)$$

A_1, A_2 根据方波与光敏区的位置 j_H 不同,可能为 3种情况。以 A_1 为例:

1)当 $t = V/2$ 时积分结束时, 输入波 $\max = 1$ 的左侧位置为:

$$s_1 \equiv -\pi/2 + \gamma t \equiv -\pi/2 + \gamma V/2 \quad (10)$$

而距输入光信号 \max 最近的光敏元左侧位置为:

$$s_2 \equiv -j_H = T/2 \quad (11)$$

如图 3 所示, 当 $s_1 < 0$ 时, A_1 的阴影区显然不存在, $A_1 = \emptyset$.

2)当 $t = -V/2$, 在光积分起始时刻输入波左侧为 $s_3 = -c/2 - vV/2$ 若 $s_3 \leq s_2$ 而 $s_2 < s_1$ 时, 阴影区 4 为三角形, 如图 4. 设 $v = s_1 - s_2$, $t = uN$ 则

$$A_1 = ut_1/2 = u^2/2V \quad (12)$$

3)当 $s_3 < s_2, s_1 > s_2$ 时, 阴影区 A_1 为梯形, 如图 5 设 $u = s_1 - s_2, w = s_3 - s_2$, 则

$$A_1 = (u + w)/2 \cdot V \quad (13)$$

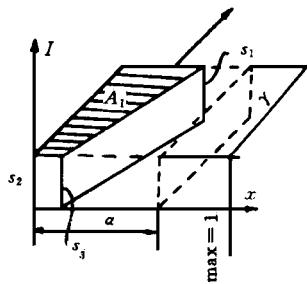


图 3

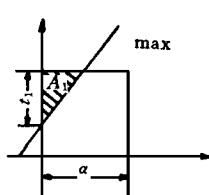


图 4

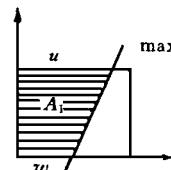


图 5

同理可得 A_2 对应各种情况的值 而对应于 B_{\min} , 有

$$B_{\min\text{动}} = Q_1 + Q_2 \quad (14)$$

Q_1, Q_2 的求解方法同 A_1

在动态 CTF 求解过程中, 因入射光波相对光敏元处于各种不同的位置而具有不同的数值, 因而很难用简明的关系式表达, 而只能用区间表达式给出。 A_1, A_2, Q_1, Q_2 可用下式求解。

$$A_1: \text{令 } u = (-\pi/2 - \nu V/2) - (j_H - T/2); k = [-\pi/2 - \nu V/2 - (j_H - T/2)]$$

$$A_2: \text{令 } u = (j_H + T/2) - (\pi/2 - \nu V/2); k = [j_H + T/2 - (\pi/2 - \nu V/2)]$$

$$Q_1: \text{令 } u = (\pi/2 - \nu V/2) - (j_H + kU - T/2); k = (\pi/2 - \nu V/2) - (j_H + kU - T/2)$$

$$Q_2: \text{令 } u = (j_H + kU + T/2) - (3\pi/2 - \nu V/2); k = (j_H + kU + T/2) - (3\pi/2 - \nu V/2)$$

$$A_1, A_2, Q_1, Q_2 = \begin{cases} 0, & u \leq 0 \\ u^2/2V, & u > 0 \leq V \\ (u + k) \cdot (V/2), & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

由式(9)和式(14)即可求得:

$$CTF_{\text{动}} = (B_{\max\text{动}} - B_{\min\text{动}}) / (B_{\max\text{动}} + B_{\min\text{动}}) \quad (16)$$

对于面阵 CCD 的 CTF, 当方波的传播方向与 CCD 光敏元 x 方向或 y 方向排列一致时, 它的 CTF 与线阵结果完全一样, 而当矩形波的传播方向倾斜光敏元排列方向时, 应先将方波方向分解成 x 方向和 y 方向两种形式, 而得到该输入矩形波在 x 方向和 y 方向两个 CTF 值, 即 CTF_x 和 CTF_y 。具体的讨论方法类似于文献 [3] MTF_x 与 MTF_y。

2 对理论分析结果的讨论

由式(6)和式(16)可算得不同结构的 CCD 在静态和动态情况下的 CTF 值。

图 6(a)和图 6(b)分别表示对结构为 $T_U = T_H = 7\mu$ (T_U 为对应 T_H 的线量) 的 CCD 器件。当输入方波图像的 $T_N = 10$ (T_N 为输入方波图像的半周期的直线量), 速度 $v = 0$ 时和 $v = \pi/1s$ 时的 CTF 值随 j_H 的变化情况。比较图 6(a)和图 6(b), CCD 对静态图像的 CTF 值

比动态图像的 CTF 值要大。图 6

(a) 和图 6(c) 则表明不同结构的 CCD 对相同输入频率 $T_N = 10\mu$ 的 CTF 值的情况。显然, 当两 CCD 光敏元中心距 T 相同时, T 较小则 CTF 值较大。反之, T 较大则 CTF 值较小。比较图 6(a) 和图 6(d), 当 CCD 光敏元尺寸 T 相同时, T 越大, 则 CTF 值越小。对 CTF 的讨论类似 [3], 由于 CTF 也是随着入射频率的相位相对 CCD 光敏元中心位置 j_H 而变化的。同样, 我们也认为用 3 组 CTF 值, 即 CTF_{max} , CTF_{min} , CTF_{avor} 来表达 CCD 对不同频率方波的响应比较全面。图 7、图 8 给出了不同结构的 CCD 在 $v = 0$ 时随不同空间频率方波 $T_N = 40T^j$ ($j = 1, 2, \dots$) 变化的 3 组 CTF 值。从图中显而易见, CCD 相邻光敏元中心距一定时, 光敏元尺寸 T 越小, 分辨率越高, 如图 7、图 8 而 CCD 的光敏元尺寸相同时, 相邻光敏元中心距 T 越大, 对不同频率的分辨率越低。

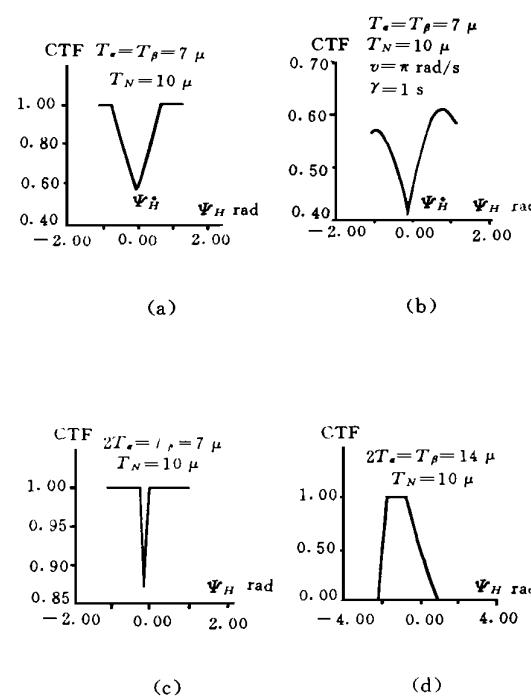


图 6

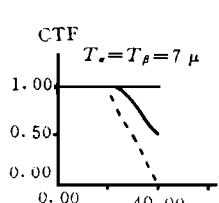


图 7

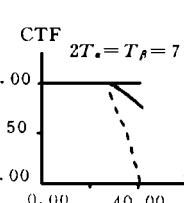


图 8

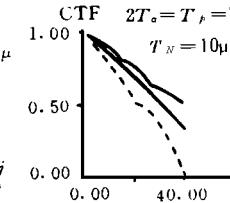


图 9

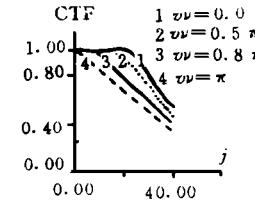


图 10

图 9 给出了结构为 $T_s = T_f = 7\mu$ 的 CCD 对速度为 $v = \pi$ rad/s, 积分时间 $\gamma = 1$ s 的动态图像的响应情况。显然, 与同结构静态目标的 CTF 相比, CCD 对不同频率动态目标的分辨力均较差。通过此图也可看出, 随输入频率 T_N 的增加, CCD 的 CTF 值在下降。图 10 表明了此结构的 CCD 对不同速度动态图像的 CTF 平均值。图中清楚地表明, 随着输入方波图像速度 v 的升高, CTF 的值越小。

3 实验与结果分析

定量测量 CCD 的方波对比传递函数的实验装置如图 11, 根据 TCD 142D 型 CCD 的光敏

元尺寸 $T_E = T_U = 14\mu$, 我们选用焦距为 25 mm 镜头。通过成像变换和改变输入靶而得到不同的输入频率。各空间频率的光栅列于表 1。由表 1 可知, 40 lp/mm 的空间频率已经超过了 CCD 的 Nyquist 极限频率, 它被作为此次实验中 CCD 响应的极限频率。

根据测得不同空间频率的 CTF 值, 我们在图 12 绘出此 CCD 的实验曲线和通过式(6)、式(7)和式(8)算得的理论曲线。由于我们测量频率有限, 因此 CTF 的最大值、最小值和平均值三条曲线都是用折线来表示的。虽然由于光学系统的衍射、像差、杂光及测量系统误差的影响(其中包括光学系统的传递函数值), 实验曲线与理论曲线并不完全一致, 但 CCD 的对比传递函数的性质, 已经在实验中很清楚地表达出来了。

由图 12 可知: ① 当输入图像的空间频率

较低时, CCD 的响应值 CTF 比较大。例 18 1lp/mm 的 CTF_{平均} = 0.79, 而当输入较高空间频率时, CCD 的响应值 CTF 是较小的。例 40lp/mm 的 CTF_{平均} = 0.25。② 当输入图像的频率比较低时, CCD 的 CTF 随 j_H 变化较小。随着输入频率的升高, CCD 的 CTF 随 j_H 变化增大, 即从 CTF_{max} 到 CTF_{min} 变化的幅度增大。③ 当输入图像的空间频率超过了

表 1

物空间 /lp° mm ⁻¹	像空间 /lp° mm ⁻¹	T _N /μm	T _E /μm	T _U /μm
1/1.2	18	28	14	
1/2	20	25	14	
1/1.6	25	20	14	
1/1.4	28	17.5	14	
1/1.2	33	15	14	
1/1	40	12.5	14	

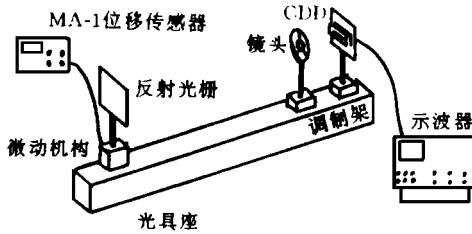


图 11

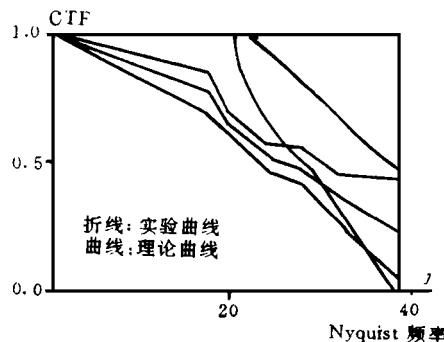


图 12

Nyquist 极限频率时, 在某些光敏元位置的响应是相当差的, CTF 值很小, 图像条纹基本无法分辨。

显然, 以上结论与我们前面讨论的 CCD 的 CTF 理论结果一致。如能事先将镜头的对比传递函数值测得, 然后对实测的实验结果给予修正, 实验结果与理论结果将符合更好。

参 考 文 献

- 1 Boreman G, Derenlak E L. Method for Measuring Modulation Transfer Function of Charge-coupled Devices Using Laser Speckle. Opt. Eng. , 1986, 25(1): 148~ 150
- 2 Martin S, Boreman G D, Ducharme A D, Snyder D R. Modulation Transfer Function Testing of Detector Arrays Using Narrow-band Laser Speckle. Opt. Eng. , 1993, 32(2): 395~ 399

- 3 郑琳,仲思东,何对燕.电荷耦合成像器件的调制传递函数.武汉测绘科技大学学报,1996,21(2): 176~182
- 4 袁祥辉.固体图像传感器及其应用.重庆:重庆大学出版社,1992 43~46
- 5 王以铭.电荷耦合器件原理与应用.北京:科学出版社,1987. 147~148

Judging CCD Imaging Sensor Output Image Signal Quality by Square-wave Contrast Transfer Function

Zhong Sidong Zheng Lin

(School of Photoelectric Engineering, W TU SM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

Abstract A method for judging charge-coupled device(CCD) imaging sensor output image signal quality by square-wave contrast transfer function(CTF) is presented. The formulas for calculating the square-wave CTF of CCD imaging sensor are given. This paper centers on using square-wave CTF to analyze the spatial-frequency response of ideal CCD systems. It is verified that the results from experiment are closed to the theory values. The research results will allow more accurate design of systems to discrete devices such as CCD.

Key words CCD imaging sensor; square-wave contrast transfer function; judging image quality

广告征订启事

本刊是测绘类核心期刊之一,在测绘及相关领域拥有大批固定的读者;出版有与印刷版相一致和同步的光盘版,可以直接进入 Internet 进行传输;今年,又被世界四大著名检索系统之一的美国《工程索引》(EI)收录,成为中国第一个进 EI 的测绘刊物。本刊所拥有的这些优势,将为测绘生产单位、仪器厂商的有关宣传提供良好的预期效果。为了更好地服务测绘领域,本刊决定自 1997 年第 1 期起承接有关仪器、产品、软件、工程信息、形象宣传等广告业务,特公告国内外客户。有关材料可向本刊编辑部索取。为进一步提高广告效果,本刊自明年起将改为 A4 开本。我们将努力使我们的读者成为你们的用户。

(本刊编辑部)