

# 电荷耦合成像器件的调制传递函数

郑琳 仲思东 何对燕

(武汉测绘科技大学电子信息工程与精密机械学院, 武汉市珞喻路39号, 430070)

**摘要** 提出用调制传递函数 MTF 评价 CCD 像传感器成像质量的方法, 给出了计算 CCD 像传感器调制传递函数 MTF 的公式, 并着重分析了 CCD 像传感器的离散性对成像质量的影响。

**关键词** 电荷耦合器件; 调制传递函数; 分离采样

**分类号** P246

CCD 作为光学系统中图像接收器件已成为光学系统的一个组成部分, 如何评价其成像质量, 已成为人们普遍关注的问题<sup>[1,2]</sup>。作为固体图像传感器, CCD 最重要的性能指标是分辨率, 即 CCD 的空间频率响应。应用光学传递函数的理论来评价某一系统, 系统本身应具有线性性和时间、空间不变性。而我们所研究的 CCD, 它在工作范围内的响应是线性的, 在空间上是离散变化的, 不满足使用传递函数的第二个条件。文献[3~4]给出了 CCD 调制传递函数:

$$MTF = \frac{M(\nu_s)}{M(0)} = \frac{\sin(\pi\nu_s T_a)}{\pi\nu_s T_a} = \frac{\sin\left(\frac{\pi T_a}{2T_\beta} \cdot \frac{\nu_s}{\nu_{s, \max}}\right)}{\frac{\pi T_a}{2T_\beta} \cdot \frac{\nu_s}{\nu_{s, \max}}} \quad (1)$$

其中  $T_a$  为像元宽度,  $T_\beta$  为像元中心距,  $\nu_s$  为输入空间频率,  $\nu_{s, \max}$  为可分辨的最高空间频率,  $\nu_{s, \max} \leq T_\beta/2$ 。

上式并没有考虑像元的离散性以及运动图像对 MTF 的影响, 而是将 CCD 近似地看成一个空间不变系统。显然, 直接用经典的传递函数理论来讨论 CCD 的分辨率是不完善的。

## 1 用调制传递函数评价 CCD 的数学模型

### 1.1 线阵 CCD 对静态图像的 MTF

当输入为静止的一维图像的光强分布时, 设其表达式为:

$$I(x) = \frac{1}{2}(1 + \cos x) \quad (2)$$

此时输入函数的调制度  $M=1$ ,  $x$  为弧度值, 如图 1。输入一维图像的光强分布的周期为  $T=1/f$ , 半周期  $T_N=T/2$ 。

线阵 CCD 的光敏区结构如图 2 所示, 其中  $T_a$  为 CCD 像元宽度,  $T_\beta$  为相邻 CCD 像元间距。为计算方便, 我们把  $T_a$ 、 $T_\beta$ 、 $T_N$  规化为弧度值:

$$\alpha = \frac{T_a}{T_N}\pi, \beta = \frac{T_\beta}{T_N}\pi \quad (3)$$

如图 3 所示, 对于输入一维图像光强分布的某一周期, 我们设  $\psi_H$  为该周期中光强最大值到离它最近的光敏元中心之间的距离。设  $\psi_L$  为该周期中光强最小值到离它最近的光敏元中心

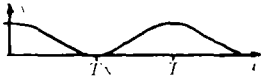


图 1

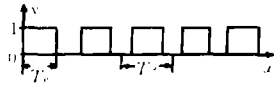


图 2

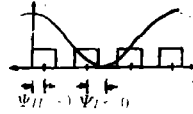


图 3

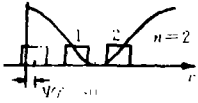


图 4

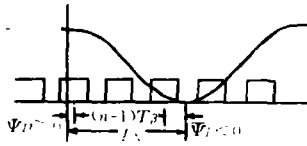


图 5

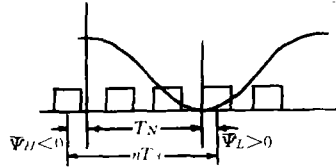


图 6

之间的距离。 $\psi_H$  和  $\psi_L$  均为弧度值。显然,  $\psi_H, \psi_L$  的变化范围是:

$$-\frac{\beta}{2} \leq \psi_H < \frac{\beta}{2}, \quad -\frac{\beta}{2} \leq \psi_L < \frac{\beta}{2} \quad (4)$$

若输入函数的半周期所跨越的像元数为  $n$ , 则

$$n = \text{int}\left(\frac{T_N}{T_\beta}\right) + 1 \quad (5)$$

如图 4, 当  $\psi_L = \pm\beta/2$  时, 令  $\psi_H = \psi_H^*$ , 则

$$\psi_H^* = \pi - (n - 0.5)\beta \quad (6)$$

在输入函数的半周期内, 其输出图像光强分布的调制度  $M'$  为:

$$M' = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} \quad (7)$$

$B_{\max}, B_{\min}$  为输出一维图像的光强分布在某像元处的最大亮度响应值与最小亮度响应值。对于 CCD 器件, 它们以电荷量的形式体现。对静态图像, CCD 像元上的电荷量正比于照射在该像元上的光功率; 对于动态图像, 则正比于照射在该像元上的光能量。所以,

$$\text{MTF} = \frac{M'}{M} = M' = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} \quad (8)$$

由图 5 可知,  $T_N = \bar{\psi}_H + (n-1)T_\beta - \bar{\psi}_L$ 。所以,

$$-\bar{\psi}_L = T_N - (\bar{\psi}_H + (n-1)T_\beta) \quad (9)$$

其中  $\bar{\psi}_H, \bar{\psi}_L$  为  $\psi_H$  和  $\psi_L$  的长度值。将上式转化为弧度值得:

$$\psi_L = -(\pi - (\psi_H + (n-1)\beta)) \quad (10)$$

同理, 由图 6 得:

$$\psi_L = -(\pi - (\psi_H + n\beta)) \quad (11)$$

设

$$k = \begin{cases} n & \psi_H \leq \psi_H^* \\ n-1 & \psi_H > \psi_H^* \end{cases}$$

则

$$\psi_L = -(\pi - (\psi_H + k\beta)) \quad (12)$$

由图 7 即可求得:

$$B_{\max} = \int_{\psi_H - \frac{\alpha}{2}}^{\psi_H + \frac{\alpha}{2}} I(x) dx = \int_{\psi_H - \frac{\alpha}{2}}^{\psi_H + \frac{\alpha}{2}} \frac{1}{2} (1 + \cos x) dx = \frac{1}{2} \alpha + \sin \frac{\alpha}{2} \cos \psi_H \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 B_{\min} &= \int_{\psi_L - \frac{\alpha}{2}}^{\psi_L + \frac{\alpha}{2}} I(x) dx = \int_{\psi_L - \frac{\alpha}{2}}^{\psi_L + \frac{\alpha}{2}} \frac{1}{2} (1 + \cos x) dx \\
 &= \frac{1}{2} \alpha + \sin \frac{\alpha}{2} \cos \psi_L
 \end{aligned} \tag{14}$$

把式(12)代入式(14)得:

$$\begin{aligned}
 B_{\min} &= \frac{1}{2} \alpha + \sin \frac{\alpha}{2} \cos(\pi - (\psi_H + k\beta)) \\
 &= \frac{1}{2} \alpha + \sin \frac{\alpha}{2} \cos(\psi_H + k\beta)
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\text{MTF}_{\text{静}} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2} [\cos \psi_H - \cos(\psi_H + k\beta)]}{\alpha + \sin \frac{\alpha}{2} [\cos \psi_H + \cos(\psi_H + k\beta)]} \tag{16}$$

### 1.2 线阵 CCD 对动态图像的 MTF

当输入一维图像的光强分布以一定速度  $v$  运动时, 其表达式为:

$$I(x) = \frac{1}{2} (1 + \cos(x - vt)) \tag{17}$$

如图 8,  $\psi_H, \psi_L, T_\alpha, T_\beta, n, k, \psi_H^*$  定义与前相同。设 CCD 的光积分时间为  $\gamma$  (s), 输入图像的速度为  $v$  (rad/s), 则

$$B_{\max} = \int_{-\gamma/2}^{\gamma/2} \int_{\psi_H - \frac{\alpha}{2}}^{\psi_H + \frac{\alpha}{2}} \frac{1}{2} [1 + \cos(x - vt)] dx dt = \frac{1}{2} (\alpha\gamma + \frac{4}{v} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{v\gamma}{2} \cos \psi_H) \tag{18}$$

$$B_{\min} = \int_{-\gamma/2}^{\gamma/2} \int_{\psi_L - \frac{\alpha}{2}}^{\psi_L + \frac{\alpha}{2}} \frac{1}{2} [1 + \cos(x - vt)] dx dt = \frac{1}{2} (\alpha\gamma + \frac{4}{v} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{v\gamma}{2} \cos \psi_L) \tag{19}$$

把式(12)代入式(19)得:

$$B_{\min} = \frac{1}{2} [\alpha\gamma + \frac{4}{v} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{v\gamma}{2} \cos(\psi_H + k\beta)] \tag{20}$$

$$\text{MTF}_{\text{动}} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \frac{v\gamma}{2} [\cos \psi_H - \cos(\psi_H + k\beta)]}{\frac{\alpha v \gamma}{2} + \sin \frac{v\gamma}{2} \sin \frac{\alpha}{2} [\cos \psi_H + \cos(\psi_H + k\beta)]} \tag{21}$$

### 1.3 面阵 CCD 对静态图像的 MTF

面阵 CCD 器件与线阵 CCD 所不同的是分为帧传输结构 (FT) 和行间传输结构 (IT)。当图像光强分布的方向与光敏元水平排列方向一致, 或者与光敏元竖直方向排列一致时, 以上讨论的线阵 CCD 的 MTF 结论均适合面阵 CCD 结构。需要指出的是, 由于面阵 CCD 的光敏元在水平方向分布的  $\alpha_x, \beta_x$  与竖直方向分布的  $\alpha_y, \beta_y$  不相同, 因此, 面阵 CCD 在  $x$  方向和  $y$  方向的分辨率是不相同的。

如图 9 所示, 设入射图像的光强分布为:

$$I(x, y) = \frac{1}{2} [1 + \cos(x + y)] \tag{22}$$

等光强线的法向  $s_p$  与光敏区  $x$  方向的夹角为  $\theta_p$ , 图中各参数的定义如下:  $T_{\alpha x}$  为  $x$  方向的

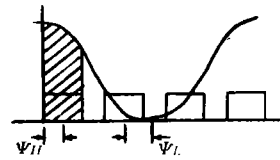


图 7

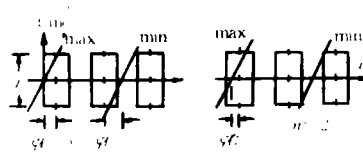


图 8

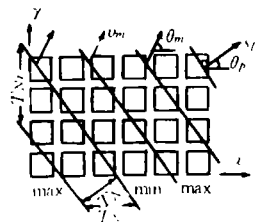


图 9

光敏元尺寸,  $T_{\beta_x}$  为  $x$  方向上相邻光敏元中心间距离,  $T_{\alpha_y}$  为  $y$  方向的光敏元尺寸,  $T_{\beta_y}$  为  $y$  方向上相邻光敏元中心间距离。在  $x$  方向上,

$$T_{N_x} = \frac{T_N}{\cos\theta_p} \quad (23)$$

为计算方便,仍把长度量换算为角度量:

$$\alpha_x = \frac{T_{\alpha_x}}{T_{N_x}} \cdot \pi = \frac{T_{\alpha_x}}{T_N} \cdot \pi \cos\theta_p, \beta_x = \frac{T_{\beta_x}}{T_{N_x}} \cdot \pi = \frac{T_{\beta_x}}{T_N} \cdot \pi \cos\theta_p \quad (24)$$

$x$  方向上,半周期  $T_{N_x}$  所跨越的光敏元个数为:

$$n_x = \text{int}\left(\frac{T_{N_x}}{T_{\beta_x}}\right) + 1 = \text{int}\left[\frac{T_N}{T_{\beta_x} \cos\theta_p}\right] + 1 \quad (25)$$

$\psi_H$ 、 $\psi_L$  与前面定义基本相同,所不同的是  $\psi_H$  为输入图像某周期最大值到离它最近光敏元对称中心点在  $x$  方向的距离;  $\psi_L$  为最小值到离它最近的光敏元对称中心点在  $x$  方向的距离。当  $\psi_L = \pm\beta_x/2$  时,

$$\psi_H^* = \pi - (n_x - 0.5)\beta_x \quad (26)$$

$$\text{取 } k = \begin{cases} n_x & \psi_H \leq \psi_H^* \\ n_x - 1 & \psi_H > \psi_H^* \end{cases} \quad (27)$$

如图9,在面阵 CCD 的  $x$  方向任取一行讨论,有:

$$B_{\max} = \int_{-\frac{\alpha_y}{2}}^{\frac{\alpha_y}{2}} \int_{\psi_H - \frac{\alpha_x}{2}}^{\psi_H + \frac{\alpha_x}{2}} \frac{1}{2} [1 + \cos(x + y)] dx dy = \frac{1}{2} \alpha_x \alpha_y + 2 \sin \frac{\alpha_x}{2} \sin \frac{\alpha_y}{2} \cos \psi_H \quad (28)$$

$$B_{\min} = \int_{-\frac{\alpha_y}{2}}^{\frac{\alpha_y}{2}} \int_{\psi_L - \frac{\alpha_x}{2}}^{\psi_L + \frac{\alpha_x}{2}} \frac{1}{2} [1 + \cos(x + y)] dx dy = \frac{1}{2} \alpha_x \alpha_y + 2 \sin \frac{\alpha_x}{2} \sin \frac{\alpha_y}{2} \cos \psi_L \quad (29)$$

同前一样有  $\psi_L = -[\pi - (\psi_H + k\beta_x)]$ , 则

$$\text{MTF}_x = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} = \frac{\sin \frac{\alpha_x}{2} \sin \frac{\alpha_y}{2} [\cos \psi_H - \cos(\psi_H + k\beta_x)]}{\frac{\alpha_x \alpha_y}{2} + \sin \frac{\alpha_x}{2} \sin \frac{\alpha_y}{2} [\cos \psi_H + \cos(\psi_H + k\beta_x)]} \quad (30)$$

同样在  $y$  方向有:

$$T_{N_y} = \frac{T_N}{\sin\theta_p}, \alpha_y = \frac{T_{\alpha_y}}{T_{N_y}} \cdot \pi = \frac{T_{\alpha_y}}{T_N} \cdot \pi \sin\theta_p \quad (31)$$

$$\beta_y = \frac{T_{\beta_y}}{T_{N_y}} \cdot \pi = \frac{T_{\beta_y}}{T_N} \cdot \pi \sin\theta_p, n_y = \text{int}\left(\frac{T_{N_y}}{T_{\beta_y}}\right) + 1 = \text{int}\left(\frac{T_N}{T_{\beta_y} \cdot \sin\theta_p}\right) + 1 \quad (32)$$

$\psi_H$ 、 $\psi_L$ 、 $\psi_H^*$ 、 $k$  与上面含义相似,只是在  $y$  方向上定义的。得:

$$\text{MTF}_y = \frac{\sin \frac{\alpha_x}{2} \sin \frac{\alpha_y}{2} [\cos \psi_H - \cos(\psi_H + k\beta_y)]}{\frac{\alpha_x \alpha_y}{2} + \sin \frac{\alpha_x}{2} \sin \frac{\alpha_y}{2} [\cos \psi_H + \cos(\psi_H + k\beta_y)]} \quad (33)$$

#### 1.4 面阵 CCD 对动态图像的 MTF

如图9,当输入图像以一定速度  $v_m$  沿方向  $\theta_m$  运动时,此 CCD 的传递函数与静态相比又发生了变化。首先是要进行运动速度在图像光强分布方向上的分解,即

$$v_p = v_m \cdot \cos(\theta_m - \theta_p) \quad (34)$$

而后便得到了  $v_p$  在  $x$  和  $y$  方向的速度分解:

$$v_{px} = v_p \cos\theta_p = v_m \cos\theta_p \cos(\theta_m - \theta_p), v_{py} = v_p \sin\theta_p = v_m \sin\theta_p \cos(\theta_m - \theta_p) \quad (35)$$

可推得:

$$MTF_{x动} = \frac{\sin \frac{\alpha_x}{2} \sin \frac{\alpha_y}{2} \sin \frac{v_{px}\gamma}{2} [\cos \psi_H - \cos(\psi_H + k\beta_x)]}{\frac{\alpha_x \alpha_y v_{px} \gamma}{4} + \sin \frac{\alpha_x}{2} \sin \frac{\alpha_y}{2} \sin \frac{v_{px}\gamma}{2} [\cos \psi_H + \cos(\psi_H + k\beta_x)]} \quad (36)$$

$$MTF_{y动} = \frac{\sin \frac{\alpha_x}{2} \sin \frac{\alpha_y}{2} \sin \frac{v_{py}\gamma}{2} [\cos \psi_H - \cos(\psi_H + k\beta_y)]}{\frac{\alpha_x \alpha_y v_{py} \gamma}{4} + \sin \frac{\alpha_x}{2} \sin \frac{\alpha_y}{2} \sin \frac{v_{py}\gamma}{2} [\cos \psi_H + \cos(\psi_H + k\beta_y)]} \quad (37)$$

## 2 数值结果及讨论

前面我们推导了线阵 CCD 和面阵 CCD 的 MTF。对于线阵结构的 CCD 光敏元尺寸有  $T_a = T_\beta$ ，而面阵结构又有两种型式。对于行间传输结构，光敏元结构关系为  $2T_{ax} = T_{\beta x}, T_{ay} = T_{\beta y}$ ；对于帧传输结构，光敏元结构关系为  $T_{ax} = T_{\beta x}, T_{ay} = T_{\beta y}$ 。

对于线阵 CCD 器件，我们设  $T_a = T_\beta = 7\mu\text{m}$ 。当输入图像的半周期  $T_N = 10\mu\text{m}$ ，图像运动速度  $v = 0$  时，由式(16)算得 MTF 如图 10 所示。显然，当输入图像的  $\psi_H$  在  $-\beta/2$  到  $\beta/2$  变化时，此 CCD 的 MTF 是一条变化的曲线，其最大值约为 0.78。而当  $\psi_H = \psi_H^*$  时(由式(6)知， $\psi_H^* = \pi - (n - 0.5)\beta$ ，此  $\psi_H^*$  为 MTF 曲线的极值点，对式(16)求导即可证明)，MTF 有最小值约为 0.48。由图 10 可以看出，MTF 随  $\psi_H$  不同，变化的幅度是相当大的。这说明当输入图像半周期  $T_N = 10\mu\text{m}$  时，在某些位置此 CCD 可分辨得比较清楚，而在另一些位置则分辨力比较差。那么，对一定空间频率的图像而言，因 MTF 是一变值，用什么位置的 MTF 作为 CCD 成像质量的评价指标，将是我们讨论的一个问题。

同时，根据式(16)，MTF 也是  $T_a, T_\beta$  和  $T_N$  的函数。若  $T_a$  和  $T_\beta$  保持不变，而增大  $T_N$ ，取  $T_a = T_\beta = 7\mu\text{m}, T_N = 20\mu\text{m}$ ，如图 11。显然，此 MTF 曲线的变化幅度较图 10 要小。若继续增大  $T_N$ ，当  $\psi_H$  在  $-\beta/2$  到  $\beta/2$  变化时，MTF 曲线趋于一条平行  $\psi_H$  轴的直线，即 MTF 趋于一个定值，基本与输入图像相对 CCD 光敏元的位置  $\psi_H$  无关。此时，CCD 器件可近似地看成为一个连续的光学器件。随着输入图像空间频率的增高，当  $\psi_H$  在  $(-\beta/2, \beta/2)$  变化时，MTF 曲线起伏的幅度加大，即 MTF 受输入图像与 CCD 光敏元位置关系的影响越来越强。

当输入图像以一定速度  $v = 0.5\pi \text{ rad/s}$  运动时，CCD 光积分时间为  $\gamma = 1\text{s}$ 。对于结构为  $T_a = T_\beta = 7\mu\text{m}$  的 CCD，当输入频率  $T_N = 10\mu\text{m}$  时，MTF 随  $\psi_H$  的变化如图 12 所示。与图 10 相比，对于相同的 CCD 结构，它对动态图像的响应要比对同频率的静态图像的响应差。也就是说，CCD 对动态目标的分辨能力低于对静态目标的分辨能力。

对于一定结构的 CCD 像感器，它的 MTF 随  $\psi_H$  的不同而变化。那么，究竟应该如何用 MTF 表达 CCD 成像质量呢？我们认为，可以用三组值来描述：最大值 MTF，最小

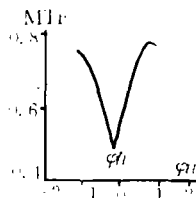


图 10

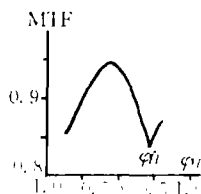


图 11

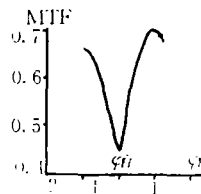


图 12

值 MTF 和平均值 MTF。给出了 MTF 的最大值和最小值,就已知了 CCD 的 MTF 的变化范围。而 MTF 的平均值是 CCD 的 MTF 的 averages 的反映,也是随  $\phi_H$  不同,MTF 出现比较集中的所在。显然,这样能比较全面地反映 CCD 在不同输入空间频率下的 MTF 的情况。

图 13 表示,当  $T_o = T_\beta = 7\mu\text{m}$ ,  $v = 0$  时,CCD 对不同空间频率  $T_N = 40T_\beta/j$  ( $j = 1, 2, \dots, 40$ ) 的最大、最小和平均的 MTF 情况。图 14 则表示当  $2T_o = T_\beta = 7\mu\text{m}$ ,  $v = 0$  时,CCD 对不同空间频率  $T_N = 40T_\beta/j$  ( $j = 1, 2, \dots, 40$ ) 的响应情况。由于图 14 的光敏元尺寸为图 13 的 CCD 光敏元的  $1/2$ ,而两个 CCD 光敏元中心距  $T_\beta$  相同,显然,图 14 的 CCD 对不同空间频率的响应比图 13 的 CCD 高。

图 15 表示的结构为  $T_o = T_\beta = 7\mu\text{m}$  的 CCD,当  $v = \pi \text{ rad/s}$ ,  $\gamma = 1\text{s}$  时,MTF 随  $T_N = 40T_\beta/j$  的变化情况。与同结构 CCD 的图 13 相比,显然 CCD 对动态图像响应要比对静态图像响应更低。随着图像速度  $v$  值的增大,它的响应 MTF 值在下降。图 16 表达了 4 种速度的 MTF 平均值的情况。显然,当输入图像的速度高到一定值时,CCD 与 MTF 值就小到没有分辨能力了。

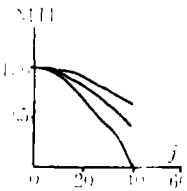


图 13

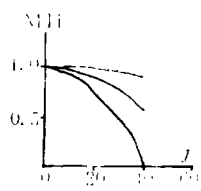


图 14

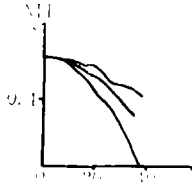


图 15

图 16 表达了 4 种速度的 MTF 平均值的情况。显然,当输入图像的速度高到一定值时,CCD 与 MTF 值就小到没有分辨能力了。

图 17 表示,当  $T_o = T_\beta = 7\mu\text{m}$ ,  $v = 0$  时,由式(1)算得的 MTF 值和由式(16)算得的 MTF 的平均值的对比情况。图中可以明显看到,由于式(1)近似地将 CCD 看成为一连续器件,因此输入空间频率越接近 Nyquist 极限,其所引入的评判误差也就越大。

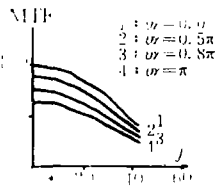


图 16

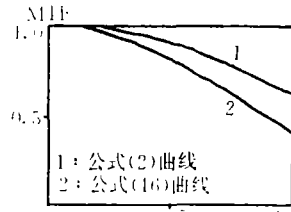


图 17 规一化空间频率

### 3 结 论

本文从研究输入图像半周期与线阵 CCD 像元位置关系入手,确立了离散结构的线阵 CCD 器件在图像半周期内的 MTF 情况,进而推广得到在整个成像面上 MTF 的极限变化区域及平均特性。通过研究与讨论,得出以下结论:

- 1) 由于 CCD 是一个离散性器件,因此它的 MTF 是一个在一定范围变化的值,而当  $\phi_H = \phi_H^*$  时,MTF 有最小值。
- 2) 为了充分表达 CCD 器件的成像特征,本文提出用最大、最小及平均的 MTF 作为 CCD 成像质量的评定指标。
- 3) 对于帧传输结构,当满足奈奎斯特抽样极限时,若输入图像为静态,MTF 的变动范围是

0.64~0,  $MTF_{\text{平均}}=0.41$ 。若输入图像运动速度  $v=1.6\pi$  rad/s, MTF 变化范围是 0.15~0,  $MTF_{\text{平均}}=0.1$ 。显然,若输入图像的运动速度继续升高,CCD 对目标已经无法分辨。

4) 对于行间传输结构,当满足奈奎斯特抽样极限时,若输入图像为静态, $y$  方向的 MTF 值与上面讨论的帧传输情况相同。 $MTF_x$  的变化范围是 0.90~0,  $MTF_{\text{平均}}=0.57$ 。若输入图像在  $x$  方向运动速度  $v=1.7\pi$  rad/s 时,  $MTF_x$  变化范围是 0.16~0,  $MTF_{\text{平均}}=0.10$ 。显然,继续提高图像运动速度,CCD 已无法分辨。

### 参 考 文 献

- 1 Boreman G, Derenlak E L. Method for Measuring Modulation Transfer Function of Charge-coupled Device Using Laser Speckle. *Opt. Eng.*, 1986,25(1):148~150
- 2 Sensiper M, Boreman G D. Modulation Transfer Function Testing of Detector Arrays Using Narrow-band Laser Speckle. *Opt. Eng.*, 1993,32(2):395~399
- 3 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
- 4 王以铭. 电荷耦合器件原理与应用. 北京:科学出版社,1987. 147~148

## The Modulation Transfer Function of Charge-coupled Devices

Zheng Lin Zhong Sidong He Duiyan

(School of Electronic Information Engineering & Precision Mechanics,  
WTUSM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

**Abstract** A method for judging charge-coupled device (CCD) imaging sensor by modulation transfer function (MTF) is presented. The formulas for calculating the MTF of CCD imaging sensor are also given. This paper centers on using MTF to analyze the spatial frequency response of ideal CCD systems. The resultant information will allow more accurate design of systems incorporating discrete devices such as CCDs.

**Key words** charge-coupled devices; modulation transfer function; sampling

\*\*\*\*\*  
(上接第149页)

system of remotely sensed image understanding. The setting up of fact-base files, the knowledge expression and acquisition, fuzzy inference and the connection with the system of remote sensing image processing and GIS software are discussed in detail. RSSTAR, as one of the so-called universal expert systems for remote sensing image analysis has been introduced with its development and preliminary effect.

**Key words** remotely sensed image understanding; universal expert system