

CCD 刷式扫描成像系统的灵敏度分析

张孝霖

(华北光电研究所)

提 要

本文系统地分析了 CCD 刷式扫描成像系统的灵敏度, 并导出了系统的 $NE\Delta_0$ 方程, 此结果能有效地用于实际的工程设计。按此, 能合理地选择系统参数, 并灵活地平衡各参数间的关系。

这里对系统的 MTF 也进行了全面的分析。除对后置电路的 MTF, 作了进一步的分析外, 还特别根据 CCD 本身的工作特点, 对 CCD 光敏面的积分 MTF, 进行了严格的分析, 得出了 MTF_i 的准确结果, 从而使我们能改正已有文献中所引用的一些不确切的 MTF_i 的表达式。

自 CCD 问世以来, 已有显著的发展。作为移位寄存器的 CCD 与光敏面在单片上成互联, 进行电荷耦合与信息处理, 已经在成像技术方面取得了重大进展。由于这种 CCD 成像器件(以下统一简称为 CCD, 但指成像的称 CCD 器件)在重量、体积、可靠性, 特别在信息预处理上有突出的优点, 从而在空间技术中引起了广泛的注意, 并重点加以发展。因而有必要对整个成像系统的灵敏度进行分析, 这里着重分析利用 CCD 线列进行刷式扫描成像的系统。对一般的光敏器件(包括 CCD)已有不少文献^[1~3]进行了灵敏度分析。对 CCD 成像系统的分析虽也进行过, 但还没有完整而详细的结果。并且已有结果大都是根据器件噪声机构的理论分析而不是根据 CCD 的实测参数, 从而较难直接用于工程设计。对系统调制传递函数 MTF 的分析也不全面甚至不确切, 因而必须加以修正。

一、基本分析

1. 在光敏面的每一面元上产生的信噪比为

$$(S/N)_\lambda = \frac{P_{s,\lambda}}{P_N}, \quad (1)$$

式中 P_s 与 P_N 分别表示信号与噪声功率, 下标 λ 表示单色的结果。如果计及光信号的量子效率 η_λ , 则有

$$(S/N)_\lambda = \frac{P_{s,\lambda}\eta_\lambda}{P_N} = \frac{P_{s,\lambda}}{P_N/\eta_\lambda} = \frac{P_{s,\lambda}}{NEP_\lambda}, \quad (2)$$

式中 NEP_λ 是熟知的等效噪声功率, 本身已隐含着量子效率这一因素。到达面积为 A_0 的光学收集孔径上的光功率 $P_{s,\lambda} = A_0 H_\lambda$, 考虑到大气与光学系统的损失, 则到达光敏元上的光功率为

$$P_{s,\lambda} = A_0 N_\lambda \omega_x \omega_y \tau_{a,\lambda} \tau_{o,\lambda}, \quad (3)$$

式中 H_λ 与 N_λ 分别是单色照度与地物亮度。 ω_x 与 ω_y 是 x 与 y 方向上的瞬时视场角。

$\tau_{0,\lambda}$ 与 $\tau_{0,\lambda}$ 分别是波长为 λ 的光在大气与光学系统中的透过率, 对于 CCD, 常用来表征其探测限度的实测参数是等效噪声曝光 NEE_λ 。 NEE_λ 与 NEP_λ 间的关系为

$$NEP_\lambda = \frac{NEE_\lambda}{t_i} A_d, \quad (4)$$

式中 A_d 是探测元的光敏面面积, t_i 是光敏面的光积分时间。 NEP_λ 还可表示为单位带宽的形式

$$NEP_{\lambda, \Delta f} = \frac{NEE_\lambda}{t_i} \frac{A_d}{\sqrt{\Delta f}}. \quad (5)$$

于是用 $NEP_{\lambda, \Delta f}$ 来表达的 $(S/N)_\lambda$ 为

$$(S/N)_\lambda = \frac{A_0 N_\lambda \omega_x \omega_y \tau_{a,\lambda} \tau_{0,\lambda}}{NEP_{\lambda, \Delta f} \sqrt{\Delta f}}. \quad (6)$$

但是在 $0.37 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 波长范围, 按测试习惯用 NEE_λ 来表达 $(S/N)_\lambda$, 于是

$$(S/N)_\lambda = \frac{G_0}{NEE_\lambda} N_\lambda \omega_x \omega_y \tau_{a,\lambda} \tau_{0,\lambda} t_{i_0}. \quad (7)$$

式中 $G_0 = A_0/A_d$ 是光学增益。式(7)为以下进行分析的出发点之一。

2. 由于 CCD 的光敏面是采取间断积分形式工作的^[4], 这就决定了与一般连续扫描方式有显著不同的特点。这里着重指出, CCD 的输出本身就不是连续的响应波形, 而是将 t_i 时间内拾取的信息也即对应的响应电荷进行积分后在远小于 t_i 的时间间隔 t_r 内以脉冲形式转移输出的。因而刷式扫描中 CCD 的响应输出及其 MTF, 就不同于一般连续扫描, 如光机扫描下的结果。

此外, CCD 光敏元的积分带宽与移位寄存器的转移输出带宽(即后置电路的工作带宽), 也是完全不同的。图 1 表示相应驱动脉冲波形与时间图。

由飞行中扫描成象的普通原理可知, 不漏扫而又不重迭扫描下的每行扫描时间为

$$t_{i,0} = \frac{\omega_y}{(V/H)}, \quad (8)$$

式中 (V/H) 是空载平台的飞行速高比。由于

$$t_i = t_i + t_r, \quad (9)$$

且因 $t_r \ll t_i$, 所以有

$$t_{i,0} \simeq t_i = \frac{\omega_y}{(V/H)}. \quad (10)$$

当有重迭扫描, 且设扫描重迭次数为 e 时, 行扫描与积分时间相应缩短成为

$$t_i = \frac{\omega_y}{e(V/H)}. \quad (11)$$

显然光敏面每一面元的积分带宽均为

$$\Delta f_i = \frac{1}{2t_i} = \frac{e(V/H)}{2\omega_y}, \quad (12)$$

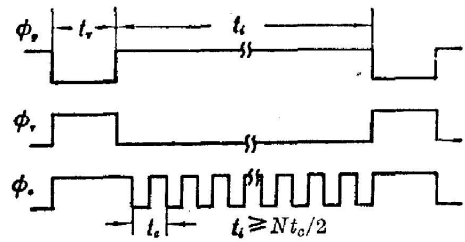


图 1 CCD 主要驱动脉冲波形与时间图
Fig. 1 Waveform and time of driving pulses for CCD photo-sensitive element

而 CCD 移位寄存器的输出带宽则显然远大于 Δf_s ,

$$\Delta f_\tau = N \Delta f_s, \quad (13)$$

式中 N 为线列元数, Δf_τ 即后置电路的最小工作带宽。且由于 CCD 的特点, 总需要在后置电路加低通滤波器以去除驱动时钟、特别是复位脉冲的干扰, 因而后置电路的带宽也不会显著地大于 Δf_τ 。

二、等效噪声反射率差与最小可分辨反射率差

1. $NE\Delta\rho$ 方程

将上节中式(7)与(11)结合, 可得

$$(S/N)_\lambda = G_0 \tau_{a,\lambda} \tau_{0,\lambda} \omega_x \omega_y^2 \frac{N_\lambda}{NEE_\lambda} \frac{1}{e(V/H)}. \quad (14)$$

如果将光学增益 G_0 由系统参数具体表示出, 即 $G_0 = \frac{\pi}{4\omega_x \omega_y F^2}$, 得

$$(S/N)_\lambda = \frac{\pi}{4} \tau_{a,\lambda} \tau_{0,\lambda} \frac{N_\lambda}{NEE_\lambda} \frac{\omega_y}{F^2} \frac{1}{e(V/H)}. \quad (15)$$

当实际探测的波长范围是 $\lambda_1 \sim \lambda_2$, 就必须对上式进行积分:

$$(S/N)_{\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (S/N)_\lambda d\lambda = \frac{\pi}{4} \frac{\omega_y}{F^2} \frac{1}{e(V/H)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{a,\lambda} \tau_{0,\lambda} \frac{N_\lambda}{NEE_\lambda} d\lambda. \quad (16)$$

当 $\Delta\lambda$ 范围较窄, $\tau_{a,\lambda}$, $\tau_{0,\lambda}$ 和 NEE_λ 在 $\Delta\lambda$ 内可取平均值代之, 于是得到

$$(S/N)_{\Delta\lambda} = \frac{\pi}{4} \tau_a \tau_0 \frac{N_{\Delta\lambda}}{NEE} \frac{\omega_y}{F^2} \frac{1}{e(V/H)}, \quad (17)$$

式中 $N_{\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_\lambda d\lambda$, τ_a , τ_0 与 NEE 都表示在 $\Delta\lambda$ 内的平均值, 但略去了下标。当 $\Delta\lambda$ 范围较宽时, 就必须对(16)式进行计算。

从上式自然可以导出系统等效噪声亮度的概念, 表示为 $NEEN_{\Delta\lambda}$, 则有

$$NEEN_{\Delta\lambda} = \frac{4}{\pi} \frac{(S/N)_{\Delta\lambda}}{\tau_a \tau_0} \frac{NEE \cdot F^2 \cdot e}{\omega_y} (V/H). \quad (18)$$

这里与以下各灵敏度方程中, 除特别说明外, 都保留了 (S/N) 不令为 1, 以便于实际工程设计中进行选择。在 $0.37 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 波长范围, 系统灵敏度由可分辨反射率差表示更为合适。且对于遥感应用, 实际出现并关心的是地物平均或典型亮度 N_{type} , 从这里开始均略去与 $\Delta\lambda$ 有关的下标。

现在令相邻两积分时间内对应地物反射率差为 $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, W 为瞬时视场对应地物以外一切光源的总等效面发光强度, 等效是指到达被照地物表面来说的。于是相邻积分时间内两瞬时视场在光敏面元上产生的功率差就是

$$\Delta P_s = A_0 \tau_a \tau_0 \omega_x \omega_y \Delta\rho W / \pi = A_0 \tau_a \tau_0 \omega_x \omega_y \Delta\rho N_{\text{type}}. \quad (19)$$

当我们研究系统可分辨反射率差时, 就应将(19)表示的 ΔP_s 代替(3)式中的 P_s , 便得

$$NE\Delta\rho = \frac{4}{\pi} \frac{e}{\tau_a \tau_0} \frac{NEE}{N_{\text{type}}} \left(\frac{S}{N}\right) \frac{F^2}{\omega_y} (V/H) \quad (20)$$

或

$$NE\Delta\rho = \frac{4}{\pi} \frac{e}{\tau_a \tau_0} \frac{NEE}{N_{\text{type}}} \left(\frac{S}{N}\right) \frac{F^2}{t_i} \quad (21)$$

2. 最小可分辨反射率差 $MR\Delta\rho$ 与系统传递函数 MTF 的关系。

2. 对系统灵敏度的分析自然还应考虑系统对空间频率 K 的响应, 即必须分析系统的调制传递函数 MTF 。

本文所考虑的 MTF 包括光学系统的传递函数 MTF_0 , CCD 光敏面的整个传递函数, 即 Y 向扫描的卷积与间隔积分过程决定的积分传递函数 MTF_i , 与 X 向电扫描中的实际为取样过程所决定的取样传递函数 MTF_s , CCD 移位寄存器的转移传递函数 MTF_r 以及后置电路的传递函数 MTF_e 。即只考虑磁带记录以前的系统传递函数。因为本文着重研究的是获取图象信息的传感器系统; 还因为图象的重现及其效果主要取决于电子计算机的处理如增强、滤波等, 由于这种处理大大改善了显示器, 记录胶片以至人眼的空间频率响应, 因而在考虑到计算机的处理与本文的目的下, 所分析的系统 MTF_s 为

$$MTF_s = MTF_0 \cdot MTF_i \cdot MTF_s \cdot MTF_r \cdot MTF_e \quad (22)$$

这里仍从 (S/N) 的分析出发。在不考虑空间频率响应下, 有

$$(S/N) = \frac{\Delta\rho}{NE\Delta\rho} \quad (23)$$

在考虑空间频率响应下就必须计入各分系统的 MTF , 并在信号与噪声中引入 MTF , 但注意噪声应取均方根值, 于是有

$$(S/N) = \frac{\Delta\rho \cdot MTF_s}{NE\Delta\rho \left[\frac{\int_0^{\Delta f} g^2(f) MTF_e^2 df}{\Delta f} \right]^{1/2}} \quad (24)$$

这里设噪声来自后置电路, 因为 CCD 的时钟干扰可以由相关双取样或其他技术加以去除, CCD 不均匀性的固有图案噪声也可由适当处理加以去除。我们进一步假定电子噪声为白噪声, 甚至如上所述, 即去除了 CCD 的时钟与固有图案噪声后, CCD 的噪声也可作为白噪声处理。则由噪声谱密度函数 $g(f)$ 与 MTF_e 的乘积就能满足

$$g^2(f) MTF_e^2 = 1 \quad (25)$$

积分限正好是系统限定的带宽, 于是

$$\left[\frac{\int_0^{\Delta f} g^2(f) MTF_e^2 df}{\Delta f} \right]^{1/2} = 1 \quad (26)$$

简化后可得

$$(S/N) = \frac{\Delta\rho}{NE\Delta\rho} MTF_s \quad (27)$$

自然这时的 $NE\Delta\rho$ 中应令 $(S/N) = 1$ 。如果令此 $\Delta\rho$ 为最小可分辨反射率差 $MR\Delta\rho$, 使得

$$MR\Delta\rho = \frac{4}{\pi} \frac{e}{\tau_a \tau_0} \frac{NEE}{N_{\text{type}}} \left(\frac{S}{N}\right) \frac{F^2}{MTF_s} \frac{(V/H)}{\omega_y} \quad (28)$$

或

$$MR\Delta\rho = \frac{4}{\pi} \frac{e}{\tau_a \tau_0} \frac{NEE}{N_{\text{type}}} \left(\frac{S}{N}\right) \frac{F^2}{MTF_s} \frac{1}{t_i} \quad (29)$$

三、系统的 MTF 分析

这里除利用了 MTF_x 与 MTF_y 的已有结果但加以必要说明外, 根据 CCD 输出信号的特点, 更详细地分析了 MTF_x 。特别是, 本文着重根据 CCD 刷式扫描成像过程是包括 Y 向与 X 向同时扫描的复杂过程, 严格地分析了这两种不同的扫描过程并得出了相应的结果。

1. CCD 光敏元 Y 向扫描过程的 MTF_y

在文献[5]中我们已经计算了在物空间物面上矩形瞬时视场扫过特定亮度分布时的响应函数。这里设与光敏元 $\Delta L_x \Delta L_y$ 对应的物面上矩形瞬时视场为 $L_x L_y$, 其函数表示为

$$L(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{L_y}\right). \quad (30)$$

地物亮度设为矩形波调制下的分布, 调制幅度为 m , 即

$$N(y) = N_{\text{type}} \left[1 + \frac{2m}{\pi} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(-1)^{p-1}}{(2p-1)} \cos(2p-1)2\pi K_y y \right], \quad (31)$$

式中 K_y 是 Y 方向的空间频率, 是空间波长 λ_y 的倒数。

一般连续扫描下是典型的卷积过程, 其响应函数是 $L(x, y)$ 与 $N(y)$ 的卷积, 这里是一维扫描, 利用逐项积分的方法可得

$$\begin{aligned} R(y) &= L(x, y) \otimes N(y) \\ &= L_x L_y N_{\text{type}} \left[1 + \frac{2m}{\pi} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(-1)^{p-1}}{(2p-1)} \text{sinc}(2p-1)\pi K_y L_y \cdot \cos(2p-1)2\pi K_y y \right]. \end{aligned} \quad (32)$$

符号 $\text{sinc} u = \frac{\sin u}{u}$ 。(32)式仅是一般连续扫描下的结果。如果将(32)式改记为沿 Y 向的响应分布密度的形式, 则有

$$\begin{aligned} r(y) &= \frac{R(y)}{L_y} \\ &= L_x N_{\text{type}} \left[1 + \frac{2m}{\pi} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(-1)^{p-1}}{(2p-1)} \text{sinc}(2p-1)\pi K_y L_y \cdot \cos(2p-1)2\pi K_y y \right]. \end{aligned} \quad (33)$$

对于 CCD, 由于采取间断积分的工作方式, 其响应输出应是 $\Delta t = t_i$ 内对 $r(y)$ 积分所形成的脉冲列 $R(n)$ 。在与 Δt 对应的 Δy 内进行积分即得

$$R(n) = \sum_{n=0}^{\infty} P_n, \quad (34)$$

其中:

$$P_n = \int_{y_n - \Delta y/2}^{y_n + \Delta y/2} r(y) dy. \quad (35)$$

问题是确定积分间隔 Δy , 按式(10) $\Delta t = t_{i,0} = \omega_y / (V/H)$, 如果将物空间 Y 方向上的瞬时视场角 $\omega_y = L_y / H$ 代入即得 $t_{i,0} = L_y / V$ 。于是与 $t_{i,0}$ 对应的 y 坐标积分间隔正好是 L_y 。当有扫描重迭且设重迭扫描次数是 e 时,

$$t_i = \frac{t_{i,0}}{e} = \frac{1}{V} \left(\frac{L_y}{e} \right), \quad (36)$$

即此时对应的 $\Delta y = L_y / e$ 。于是 CCD 响应脉冲输出为

$$\begin{aligned}
 P_n &= \int_{y_n - L_y/2e}^{y_n + L_y/2e} r(y) dy \\
 &= L_x L_y \frac{N_{\text{type}}}{e} \left[1 + \frac{2m}{\pi} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(-1)^{p-1}}{(2p-1)} \operatorname{sinc} (2p-1) \pi K_y L_y \right. \\
 &\quad \left. \times \operatorname{sinc} (2p-1) \pi K_y L_y / e \cdot \cos (2p-1) 2\pi K_y y_n \right]. \quad (37)
 \end{aligned}$$

(32)与(37)式相比差别是显然的,也是重要的。我们还可将(37)式改写为更加明晰的形式。令

$$y_n = y_0 + nL_y/e, \quad (38)$$

且设 $y_0 = 0$, 即取坐标原点在 y_0 上, 得

$$\begin{aligned}
 P_n &= L_x L_y \frac{N_{\text{type}}}{e} \left[1 + \frac{2m}{\pi} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(-1)^{p-1}}{(2p-1)} \operatorname{sinc} (2p-1) \pi K_y L_y \right. \\
 &\quad \left. \times \operatorname{sinc} (2p-1) \pi K_y L_y / e \cdot \cos (2p-1) 2\pi n K_y L_y / e \right]. \quad (39)
 \end{aligned}$$

由(32)与(39)式出发直接计算 MTF 是困难的。如果只考虑基波或地物亮度仅是正弦调制分布,就易于求出相应的 MTF。我们按如下的定义^[6]来计算 MTF_i,

$$\operatorname{MTF} = \frac{M(\text{out})}{M(\text{in})}. \quad (40)$$

关于调制度 M 的定义是熟知的,即 $M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$, 于是可算出对应于连续扫描与 CCD 间断积分的传递函数分别是

$$\operatorname{MTF}_c = \operatorname{sinc} \pi K_y L_y \quad (41)$$

与

$$\operatorname{MTF}_i = \sin c \pi K_y L_y \cdot \sin c \pi K_y L_y / e. \quad (42)$$

(42)式才是对应于 CCD 刷式扫描下的积分传递函数。(39)式的各级谐波的传递函数亦易知为

$$\operatorname{MTF}_i(p) = \operatorname{sinc} (2p-1) \pi K_y L_y \cdot \operatorname{sinc} (2p-1) \pi K_y L_y / e. \quad (43)$$

因而文献[3]中提出的形式 $\operatorname{sinc} \left(\frac{f}{f_{\max}} \frac{\pi \Delta L_x}{P} \right)$ 或文献[7]中引用的 $2\Delta L_x \Delta L_y \operatorname{sinc} (2\pi K \Delta L_x)$ 仅与结果(42)式相一致,即仅适用于连续扫描情况或以下将分析的非扫描的取样过程,而不适用于在刷式扫描中的 Y 向积分过程。

2. CCD 光敏面 x 方向取样过程的 MTF_i

在 x 方向的扫描形式上是由时钟驱动下的电荷移位来实现的。但在每一行的信号中,寄存器每一单元的电荷由对应的光敏元积分的电荷转移而来。光敏元积分的电荷是由地物亮度分布在像面即光敏面上的投影分布来决定的,即在 x 方向上的扫描过程实际上是典型的取样过程,光敏元在 x 方向没有任何扫描(即卷积)过程。

取样过程的 MTF_i 可以从不同的角度或定义来计算,这里采用傅氏变换的方法^[8]来计算。为简化起见,假设 x 方向亮度分布为正弦分布,即

$$N(x) = \sin 2\pi K'_x x, \quad (44)$$

式中 K'_x 是 x 方向的空间频率,取样窗口函数为 $\Delta L_y \operatorname{rect} \left(\frac{x}{\Delta L_x} \right)$, 这里 K'_x 中的上标撇号表示像空间。如所周知,物空间与像空间的问题是易于转换的,为了叙述上的清晰,这里不强调

表示上的一致。经取样后的图像函数为 $N(x)$ 与窗口函数的标积, 令为 $S(x)$,

$$S(x) = N(x) \cdot \Delta L_y \operatorname{rect}\left(\frac{x}{\Delta L_x}\right). \quad (45)$$

定义 MTF_s 为 $S(x)$ 与 $N(x)$ (即输出与输入函数) 的傅氏变换的比, 由于

$$F[N(x)] = \delta(K - K'_x), \quad (46)$$

$$\begin{aligned} F[S(x)] &= F[N(x)] \otimes \Delta L_y F\left[\operatorname{rect}\left(\frac{x}{\Delta L_x}\right)\right] \\ &= \delta(K - K'_x) \otimes \Delta L_x \Delta L_y \operatorname{sinc} \pi K \Delta L_x = \Delta L_x \Delta L_y \operatorname{sinc} \pi K'_x \Delta L_x, \end{aligned} \quad (47)$$

因任何函数与 $\delta(K - K'_x)$ 的积分都是令该函数的变量取 K'_x 值而已, 于是

$$\text{MTF}_s = \frac{F[S(x)]}{F[N(x)]} = \frac{\Delta L_x \Delta L_y \operatorname{sinc} \pi K'_x \Delta L_x}{\delta(K - K'_x)} = \Delta L_x \Delta L_y \operatorname{sinc} \pi K'_x \Delta L_x. \quad (48)$$

因为仅当 $K = K'_x$ 时 δ 函数方等于 1, (48) 式才有意义。可见已有文献关于 CCD 光敏面的 MTF 的结果或者仅考虑了 X 方向, 或者不恰当地将 Y 方向扫描当作一般的连续扫描过程, 但都没有分析过同时出现的 X 与 Y 方向的不同的扫描过程。

3. CCD 移位寄存器的转移 MTF_r

这方面已有分析结果^[4,9]。对成像 CCD 器件常采用双列寄存器结构, 有

$$\text{MTF}_r = \exp[-(Ne/2)(1 - \cos 2\pi K'_x \cdot 2d)], \quad (49)$$

式中 d 是相邻光敏元中心间距, Ne 是重要的转移损失乘积。

这里必须加以讨论的是 MTF_r 与 MTF_s 是满足连乘, 即光敏面 X 向的取样与寄存器的电荷转移过程是满足卷积定理的。但在 MTF_r 中不出现 K_y 或 K'_y , 则 MTF_s 与 MTF_r 的连乘是否有意义? 从实际过程来看, MTF_s 或 MTF_r 中虽都不出现 K_y 或 K'_y , 但是每一行的取样本身就是在对应于 t_i 的 Δy 上进行的, 这实质上是对 Δy 范围的 $N(y)$ 取平均值下进行的取样的。每一行的取样与移位转移都对应于相应的 $\Delta y_n = (L_y/e)_n$, 即每一行的 $N(x)$ 都在随 y 而变化, 这本身就是 y 的函数。在分析 MTF 中, 我们将亮度分布视为 X 与 Y 方向相互独立的, 因而独立地导出与 Y 和 X 方向过程相对应的 MTF_i 与 MTF_s , 而两者都与 MTF_r 满足连乘, 即实际过程满足卷积过程。

4. 后置电路的 MTF

通常只考虑的 RC 滤波显然是不够的。对 CCD 系统后置电路要复杂得多。特别, CCD 输出本身就是离散的脉冲列, 因而不能按通常采用的拉氏变换而必须用 Z 变换^[10]。这里考虑了前放、 RC 滤波、取样保持等基本电路, 其基本单元与频谱变换的方框图示于图 2。

由方框 1 可得

$$\text{MTF}_{e,1} = G \frac{Z^{-\tau_0/\Delta t}}{Z - e^{-\Delta t/T}}, \quad (50)$$

$$G = G_0(1 - e^{-\Delta t/T}), \quad T = RC,$$

Δt 是取样周期。

由方框 2 可得

$$\text{MTF}_{e,2} = \frac{1 - e^{-\Delta t s}}{s}. \quad (51)$$

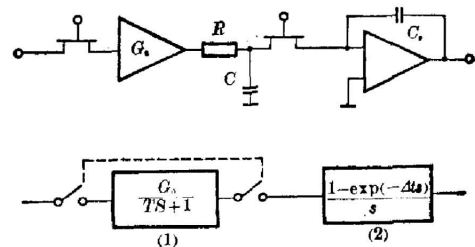


图 2 CCD 成像系统基本后置电路与积分变换结构图

Fig. 2 Schematic diagram of back circuit and integrating transform for CCD imaging system

如果略去单元 1 的滞后 τ_0 , 且将 Z 变换转换为拉氏变换, 得

$$\text{MTF}_0 = \text{MTF}_{e,1} \cdot \text{MTF}_{e,2} = G_0 \frac{B(1-e^{-4ts})}{[B-(1-e^{4ts})]s}, \quad (52)$$

其中 $B = (1-e^{-4t/T})$, 只要将 $s = j\omega$ 代入即得后置电路的频响特性。如果要增加新的信号处理单元, 只要将相应的 MTF 计算出, 如相关双取样的结果^[11], 乘入式(52)就可以了。

5. 光学系统的 MTF₀

这里以机载系统为例。对机载系统要求有广角视场, 因而短焦距的快速成像是扩大视场的关键。这时光学系统为非衍射限, 而主要为像差引起的弥散圆所限。按通常假定^[8]的弥散圆的能量分布为圆对称高斯分布 $h(x, y)$, 则 $h(x, y)$ 的傅氏变换就是系统的 MTF₀, 即

$$\text{MTF}_0 = e^{-2\pi^2\sigma^2(K_x'^2 + K_y'^2)}. \quad (53)$$

在可见光范围, MTF₀ 是易于测得的, 因而除计算数据外, 可以直接利用实测结果。

四、设计计算举例

我们利用 $NE\Delta\rho$, 即不考虑系统空间频率响应下对系统进行设计计算。因为 $NE\Delta\rho$ 方程中已经概括了光学系统主要参数 F 与 τ_0 , CCD 的重要灵敏度参数 NEE 与几何参数 $\omega_x\omega_y$ (相关于 $\Delta L_x\Delta L_y$ 与 f), 地面亮度条件 N_{type} , 大气条件 τ_a 以及飞行条件 (V/H) 等系统参数的影响。

例 1. 以法国 Spot 卫星^[12]设计为例, 计算系统对 CCD 器件 NEE 的要求。

光学参数: $f = 1082 \text{ mm}, F = 3.6$

器件尺寸: $\Delta L_x \times \Delta L_y = 13 \times 26 \mu\text{m}^2$

卫星飞行条件: $t_t = \frac{\omega_y}{(V/H)} = 3 \text{ msec}$

地面亮度条件: $N_{\text{type}}(0.52 \sim 0.6 \mu\text{m}) = 4.4 \text{ w/m}^2\text{ster.}$

设计要求: $\tau_0 = 0.5, (S/N) \geq 1, NE\Delta\rho = 0.01$

假定条件: $\tau_a = 0.8, e = 1$

可以由式(21)算出 CCD 灵敏度必需满足

$$\text{NEE}_{\Delta\lambda} \leq 3.2 \times 10^{-10} \text{ j/cm}^2 = 0.32 \text{ nj/cm}^2.$$

事实上, Spot 计划中对 CCD 的 $\text{NEE}_{\Delta\lambda}$ 要求为(更宽 $\Delta\lambda$ 范围)

$$\text{NEE}_{\Delta\lambda} \leq 0.3 \sim 0.5 \text{ nj/cm}^2.$$

这是最低要求, 但也显著高于机载系统。这显然因为星载系统的 ω_y 远小于机载系统, 且由于必需使用长焦距, F 值也随之增大了。

例 2. 选定一组参数, 计算所要求的 NEE 值, 以与例 1 相比较, 这一组参数适于机载系统。条件:

$$(S/N) = 1, F = 2, \omega_y = 0.5 \text{ mrad}, (V/H) = 0.25 \text{ r./sec.}$$

$$NE\Delta\rho = 0.01, \tau_a = 0.8, \tau_0 = 0.5,$$

地面亮度及相应 $\Delta\lambda$ 见表^[13], 计算结果如下表所示。

表 1 典型条件与参数下对 NEE 的要求值

Table 1 NEE values required for typical condition and parameter

$\Delta\lambda(\mu\text{m})$	$N_{\text{typ}1}(\text{w}/\text{m}^2\text{ster})$	$NEE_1(\text{nj}/\text{cm}^2)$	$N_{\text{typ}2}(\text{w}/\text{m}^2\text{ster.})$	$NEE_2(\text{nj}/\text{cm}^2)$
0.45~0.52	7.0	1.1	3.0	0.47
0.52~0.60	9.8	1.5	4.4	0.69
0.63~0.69	6.0	0.94	2.3	0.36
0.75~0.90	24.0	3.8	7.0	1.1

自然,为了获得所需要的 $NE\Delta\rho$ 值,当 NEE 不能满足要求时,还可适当地改变其他参数如 ω_v 或 F 等。

以上说明,这里得出的基本结果可有效地用于实际的工程设计,可借以合理地选择系统参数并平衡参数间的关系。特别是,由 Spot 卫星中 CCD 系统参数进行的验算说明,结果与理论预期的一致性是十分良好的。

在本文的写作中曾与张德欣、莘滇雄、尚仁廷等同志进行过有益的讨论,并特别感谢林钧挺同志对某些问题的提出与分析所给予的宝贵启示。

参 考 文 献

- [1] A. Rose; *J. O. S. A.*, 1948, **38**, No. 2 (Feb), 196.
- [2] B. R. Holeman, P. Gardner; «*CCD'76 3rd Internat. Conf.*», 1976, 98.
- [3] D. F. Barbe; *Proc, IEEE*, 1975, **63**, No. 1 (Jan), 38.
- [4] C. H. Sequin, M. F. Tompset; 王以铭译; «电荷转移器件»(中译本,科学出版社,1979)。
- [5] 张孝霖; «光学学报», 1981, **1**, No. 2 (Mar), 181.
- [6] 麦伟麟; «光学传递函数及其数理基础»(国防出版社,1979)。
- [7] 與石肇; 日本第3回モータヤンシンゲシンゴジウム(昭和52年,东京), 9.
- [8] J. M. Lloyd; «*Thermal Imaging Systems*», (New York, Plenum Press 1975), Chapter 3.
- [9] H. H. Hosack, R. H. Dyck; *IEEE Trans. Electron Devices*, 1975, **ED-22**, No. 3 (Mar), 152.
- [10] 陆道政,季新宝; «自动控制原理及设计», (上海科技出版社,1978)。
- [11] M. F. Whit et al.; *IEEE J. Solid State Circuits*, 1974, **SC-9**, No. 1 (Feb), 1.
- [12] 摘自 *Earth observation from space and management of planetary resources*, 509.
- [13] R. Welch; *Photog. Engng & Remote Sensing*, 1979, **45**, No. 1 (Jan), 45.

Sensitivity analysis of CCD pushbroom scanning imaging system

ZHANG XIAOLIN

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing)

(Received 2 February 1981)

Abstract

The sensitivity of CCD pushbroom scanning imaging system is analyzed systematically. The equations for system's $NE\Delta\rho$ and $MR\Delta\rho$ are derived,

$$NE\Delta\rho = \frac{4}{\pi} \frac{NEE}{\tau_a \tau_0} \frac{e}{N_{\text{type}}} \left(\frac{S}{N} \right) \frac{F^2}{\omega_y} \left(\frac{V}{H} \right),$$

$$MR\Delta\rho = \frac{4}{\pi} \frac{NEE}{\tau_a \tau_0} \frac{e}{N_{\text{type}}} \left(\frac{S}{N} \right) \frac{F_y^2}{\omega_y} \frac{(V/H)}{MTE_x}.$$

and

$$MTF_x = MTF_0 \cdot MTF_1 \cdot MTF_2 \cdot MTF_\tau \cdot MTF_{e_0}.$$

An exhaustive study of the system's MTF is made. Especially, from the scanning and operation characteristic of CCD, we differentiate the convolution and interval integration process on the Y -direction from the sampling process on the X -direction. And the integration MTF₁ on the Y -direction is analyzed severely. The exact expression of MTF₁ is obtained as follows:

$$MTF_1 = \text{sinc } \pi K_y L_y \cdot \text{sinc } \pi K_y L_y / e,$$

and so, we can correct some expressions quoted in previous literatures which do not fit the practical condition.

The results of this article are available to practical engineering design. From which, the system parameters can be selected properly and the relations between parameters can be equilibrated flexibly. Using the parameters of France Spot CCD program, we make a practical calculation. It is expected that the consistency is very good.