

微光 CCD 摄像器件灵敏度研究

魏泽斌 邹异松

(北京工业学院工程光学系)

提 要

本文提出了视频信噪比转移函数概念,建立了摄像 CCD 微光图像灵敏度方程。实验证实了理论模型的合理性。根据这个方程用计算机模拟计算了几种条件下微光 CCD 摄像器件探测曲线。分析这个结果后提出了提高 CCD 微光图像探测能力的几种途径。

关键词: 电荷耦合器件, 电荷耦合像感器, 微光成像特性。

一、前 言

CCD 摄像技术日臻完善, 是一种应用广泛很有前途的摄像器件。研究 CCD 摄像特性寻求进一步提高 CCD 摄像性能的有效途径是该领域的重要课题。虽然已有对 CCD 成像性能研究的报道^[1~4], 但由于 CCD 具有空间离散性, 使得 CCD 对光信号采样过程及对信号、噪声的低通滤波过程十分复杂, 求解信号和噪声的解析表达式比较困难, 至今未获得微光 CCD 图像探测灵敏度研究令人满意的报道。本文将文献[5~7]中用于研究像增强器特性时采用的信噪比传递函数概念应用于具有离散特性的 CCD 摄像特性研究。提出了视频信噪比转移函数。其主要思想是: 在微光条件下, 成像器件的信噪比和传递函数之间存在一定的制约关系。单纯用信噪比和传递函数两个量分别描述器件的低照度阈值探测能力和空间探测能力不符合实际成像物理过程, 应将两者结合起来综合评定光电成像器件微光探测能力。

二、视频信噪比转移函数数学描述

图 1 是 CCD 摄像系统对方波图案光电变换过程和初相位对成像的影响。设输入方波图案的空间频率为 F ($F < 2F_0$, $F_0 = (d_1 + d_2)^{-1}$)。随着 F 减小, 初相位对 CCD 输出信号影响减小, Thornber^[8] 认为 $(F_0/F) > 5$ 时, 可以忽略初相位 ϕ 对 CCD 质量影响。为了表示空间离散性器件采样初相位对信号和噪声的影响, 文中提出了有效采样面积 A_s 概念

$$A_s = h \cdot d_1 (F_0/2F), \quad (1)$$

式中 h , D 分别为 CCD 光敏元的宽和长。 $(F_0/2F)$ 为 CCD 光敏元对亮或暗条纹采样象元数。当 $(F_0/2F)$ 为整数时, ϕ 值为 0° 或 180° , 当 $(F_0/2F)$ 为半整数时, ϕ 值为 90° , 其它 $(F_0/2F)$ 值表示任意初相位时的情形。

CCD 对信号和噪声的低通滤波或调制作用用 MTF 表示。严格地说, 具有空间离散性器件不满足等晕性, 就不能用 MTF 表示其空间调制, 只有输入光信号空间频率小于光敏元

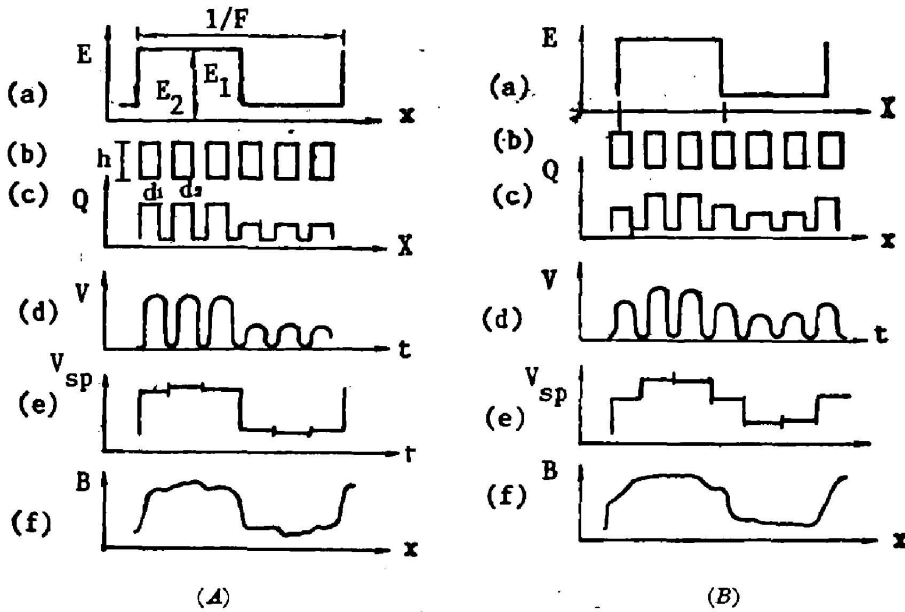


Fig. 1 photo-electron transfer process in CCD and influence of initial sampling phase on the image quality. (A) $\varphi=0$ or $\varphi=-180$, (B) $\varphi=90$

(a) input square wave image; (b) photo sites arrays of CCD; (c) charge distribution in photo sites; (d) CCD output voltage distribution; (e) electric signal after sampling and hold; (f) squarewave image display on the CRT

Nyquist 频率, 而且在输出端接有截止频率为输出采样信号 Nyquist 频率的 LPF 时, 才构成线性等晕系统, 可以用 MTF 表示

考虑 MTF 调制, 利用有效采样面积概念, 可得 COD 输出信号表示式

$$S(F) = \beta E_m \left(\frac{D}{F'} \right)^2 O A_e \tau \eta \cdot 4 \left[T(F) - \frac{T(3F)}{3} + \frac{T(5F)}{5} - \dots \right], \quad (2)$$

$$(F_c/N) \leq F \leq (F_c/2),$$

式中 β 、 D 、 F' 分别是物镜透过率、口径和焦距; $O = [(E_1 - E_2)/(E_1 + E_2)]$ 是输入方波图案对比度, τ 是摄像积分时间; η 是 CCD 的平均响应度。国产 CCD 的 η 值在 $(1.5 \sim 2) \times 10^9$ v/lm, 对应量子效率为 0.2~0.28。 $T(F)$ 为

$$T(F) = \frac{1 - [\exp(-\alpha l_0)/(1 + \alpha l)]}{1 - [\exp(-\alpha l_0)/(1 + \alpha l_0)]} \sin(F d_1) \times \exp \left[-\epsilon N \left(1 - \frac{\cos 2\pi F}{F_c} \right) \right] \sin O(T_c F / F T_c), \quad (3)$$

式中 l_0 光生载流子扩散长度; $L_D = \sqrt{D_n T_n}$; $L^{-2} = L_D^{-2} + (2\pi F)^2$; ϵ 是每次转移电荷损失。 N 是总转移次数; α 是特定波长光吸收系数; T_c 是采样周期; T_c 是 CCD 驱动脉冲周期。式中第一项是光子扩散引起的 MTF; 第二项是 CCD 离散采样过程引起的 MTF; 第三项是电荷转移过程引起的 MTF; 第 10 项对输出电信号进行采样保持产生的 MTF, 模拟计算 $T(F)$ 结果如图 2 所示。 $S(F)$ 模拟计算和测量结果如图 3 所示, 两者很好吻合。可见 CCD 输出信号随输入图像频率增大而迅速衰减, 因此, MTF 对信号的调制衰减作用不能忽略。

摄像 CCD 主要噪声源有: 光子量子噪声、暗电流噪声、表面态噪声和输出级噪声。用文

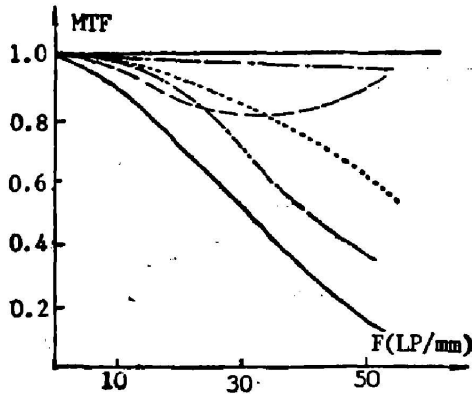


Fig. 2 The theoretical MTF of CCD $\lambda=0.8 \mu\text{m}$, $N=0.1$, $T_e/T_c=1$, $d=15 \mu\text{m}$ —
MTF (total MTF)

--- MTF (photo spread MTF)
 - - - - - MTF (output sampling MTF)
 MTF (photo sites space discretion sampling MTF) - - - - - MTF (charge transfer MTF)

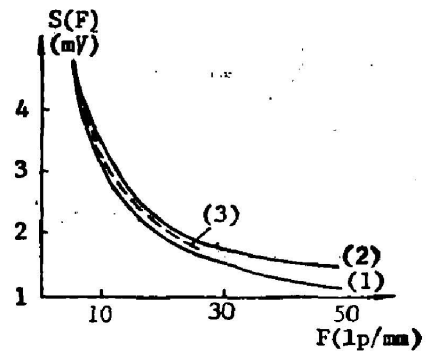


Fig. 3 Theoretical output signal voltage $E=0.11x$, $C=1$, $\tau=0.04 \text{ s}$, $D/F'=0.8$,
 $\eta=1.5 \times 10^9 \text{ mV/lm}$

(1) MTF (consider MTF)
 (2) MTF (not consider MTF)
 (3) (experiment result)

献[5]处理方法得光子噪声在 CCD 输出端为

$$N_s(F) = \left\{ \pi \beta \left(\frac{D}{F'} \right)^2 E_{ph} h d_1 F_e \tau Q \xi \int_0^\infty \left[\frac{\sin(\pi f / 2F)}{\pi f} T(F) \right]^2 df \right\}^{1/2} q C_A^{-1} A_s \quad (4)$$

式中 Q 是一流明白光中的光子数; ξ 是 CCD 量子效率; q 为电荷电量; C_A 为 CCD 输出级等效电容; A_s 为 CCD 输出级电压增益。

假设暗电流噪声在所有电极下均匀分布, 用文献[5]方法得, CCD 暗电流输出级电压表达式

$$N_D(F) = \left\{ q^{-1} P A_s F_e \tau_e J_D \int_0^\infty 4 \left[\frac{\sin(\pi f / F)}{\pi f} T_D(f) \right]^2 df \right\}^{1/2} q C_A^{-1} A_s \quad (5)$$

$$T_D(f) = \exp[-\epsilon N (1 - \cos 2\pi F / F_e)] \sin(T_e F / F_e T_c)$$

式中 P 是 CCD 相数; τ_e 为电子寿命; J_D 为暗电流值, $T_D(f)$ 为调制因子。

表面态在 CCD 输出端电压表示式为

$$N_s(F) = \left\{ 2 N K T N_{TTS} A_s F \ln 2 \int_0^\infty 2 \left[\frac{\sin(\pi f / F)}{\pi f} T_s(f) \right]^2 df \right\}^{1/2} q C_A^{-1} A_s \quad (6)$$

式中 K 是玻耳兹曼常数; T 是绝对温度; N_{TTS} 是表面态密度。 $T_s(f) = T_D(f)$, 含意相同。

CCD 输出级噪声等效为 MOSFET 的噪声^[27]。如果采用相关双取样电路消除输出级噪声, 这项噪声可以忽略不计^[28], CCD 上述几项噪声互不相关, 其总噪声可写为

$$N(F) = \{ N_s^2(F) + N_D^2(F) + N_{TTS}^2(F) \}^{1/2} \quad (7)$$

(7) 式唯一确定了输入图像量 (F , E_{ph} , O)、CCD 性能参数与输出噪声间定量关系。模拟计算结果和计算结果如图 4, 两者很好吻合。根据 (2) 式和 (7) 式可得摄像 CCD 视频信噪比转移函数 $SNT(F)$

$$SNT(F) = [S(F)/N(F)], \quad (8)$$

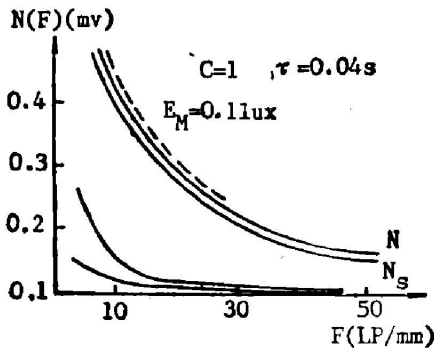


Fig. 4 Theoretical and experiment output noise voltage of CCD
—theoretical, --- experiment

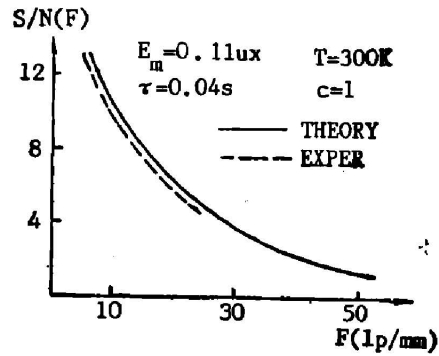


Fig. 5 Theoretical and experimenten singal to noise ratio of CCD

图 5 是 CCD 视频信噪比转移函数理论值和实验结果，两者很好吻合。说明 $SNT(F)$ 模型较好地描述了 CCD 摄像信噪比转移过程。利用 $SNT(F)$ 可以建立 CCD 微光图像探测灵敏阈方程。

三、CCD 微光图像探测灵敏阈方程及其分析

图像探测灵敏阈是表征 CCD 极限图像探测性能的综合指标，它给出了 CCD 输出视频信号刚好被显示得到规定像质图像的临界参数。根据极限信噪比原理，可列出极限探测特性方程(灵敏阈方程)

$$\frac{4\beta E_m (D/F')^2 C A_e \tau \eta}{\left\{ \pi \beta \left(\frac{D}{F'} \right)^2 E_m A_e F^{-1} \tau Q \xi \int_0^\infty 2 \left[\frac{\sin(\pi f / 2F)}{\pi f} T(f) \right]^2 df + q^{-1} P A_e F_c \tau_e J_D \int_0^\infty 4 \left[\frac{\sin(\pi f / F)}{\pi f} T_D(f) \right]^2 df + \frac{\{T(F) - [T(3F)/3] + [T(5F)/5] - \dots\}}{4NKTN_{TTS} A_e F \ln 2 \int_0^\infty \left[\frac{\sin(\pi f / F)}{\pi f} T_s(f) \right]^2 df \right\}^{1/2} q C_A^{-1} A_e} \geq \left(\frac{S}{N} \right)_{\min} \quad (9)$$

(9)式确定了一定工作条件下、一定特性的 CCD 对输入图像量(F, C, E_m)极限探测能力。如果假设 CCD 不产生任何附加噪声，转移效率百分之百，并有恒等于 1 的调制函数，根据(9)式可得理想摄像 CCD 微光图像极限探测灵敏阈方程

$$C^2 E_m F^{-1} \geq \frac{(S/N)_{\min}^2}{\pi \beta (D/F')^2 h d_1 F_c \tau \xi Q^2} \quad (10)$$

采用表 1 中参数，根据上式可得微光 CCD 理想极限探测曲线，如图 6 中曲线(9)，图中曲线(1)是根据表 1 中参数应用方程(9)得到的探测曲线，其它探测曲线是在图 6 注释条件下的探测曲线，

分析上面计算结果可得如下结论：

(1) 光子噪声 N_p 和暗电流噪声不是微光 SCCD 的主要噪声，冷却 SCCD 不是提高 CCD 微光图像探测能力的可取技术途径；(2) 采用 BCCD 减小表面态噪声是提高 CCD 微

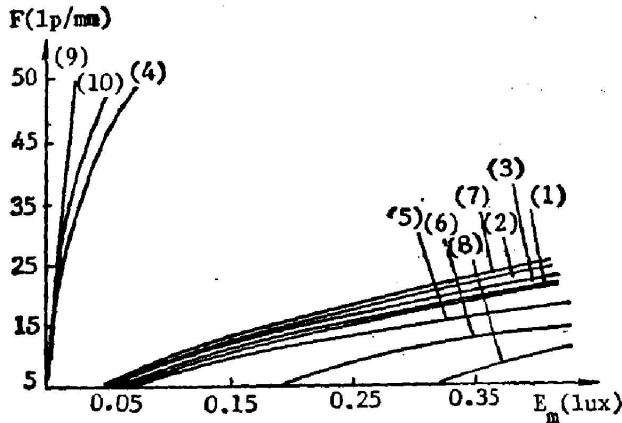


Fig. 6 Theoretical threshold of LLL-CCD

- (1) See Table. 1 and eqn (8); (2) $N_s=0$; (3) $N_p=0$;
 (4) $N_s=0$; (5) $T_a/T_c=1$; (6) $C=0.3$; (7) $T=300\text{K}$
 (8) $(S/N)_{\min}=30$; (9) $N_p=N_s=N_d=0$, $T(F)=1$;
 (10) $N_s=0$, $T=200\text{K}$

Table. 1 Working conditions and characteristic parameter of LLL-CCD

$(S/N)_{\min}=5$, $C=1$, $\beta=0.99$, $D/F'=0.8$
 $\tau=0.04\text{s}$, $\xi=0.38$, $Q=1.310$ photons/lm
 $T_a/T_c=0.5$, $\epsilon_N=0.1$, $P=3$, $\alpha=100/\text{mm}$
 $T=300\text{K}$, $J_s=1.5 \times 10^{-3}\text{A/m}^2$

光图像探测能力的最有效途径。冷却 BCCD 可使 CCD 的微光图像探测能力在低频时接近极限理想探测能力; (3) CCD 输出信号采样脉冲宽度对 CCD 探测能力影响较大, 应使采样脉冲宽度 T_s 尽可能窄; (4) 微光图像对比度对 CCD 探测能力影响较大; (5) 增大极限信噪声比值 $(S/N)_{\min}$, 提高了对成像质量的要求, 可探测域大幅度下降; (6) 理论计算结果表明。目前国产表面沟道 CCD 在实际摄像条件下, 即 $\tau=40\text{ms}$; $T=300\text{K}$; $C=0.3$; $(T_a/T_c)=0.5$; $\epsilon_N=0.1$ 时, 规定 $(S/N)_{\min}=30$, 约在 0.5Lux 平均照度下, 分辨率为 30lp/mm 。在约 $4 \times 10^{-2}\text{Lux}$ 平均照度下, 分辨率为 5lp/mm 。离 CCD 极限探测能力尚远, 有待于按上述改进技术提高器件性能。

参 考 文 献

- [1] J. E. Carnes, W. F. Kosonocky; *BOA REVIEW*, 1972, 33, p. 607.
 [2] D. F. Barbe; 1973 international conference on the appl. of CCD's, p. 13.
 [3] Marvin. H., et al.; 1973 international conf. On the appl. CCD's, p. 23.
 [4] Stephen. B. Campana; 1973 international conf. On the appl. of CCD's, p. 235.
 [5] Zou Yisong; "A theoretical analysis of performance of MCP image tube", Symposium of conf on photoelectronics image IRE, 1985, London.
 [6] 邹异松; 《夜视技术文集》, 1981, 第一卷 p. 51.
 [7] 邹异松; 《北京工业学院学报》, 1982, No. 1, p. 1.
 [8] K. K. Tornber, *Bell Systems Tech. J.*, 1973, Vol. 52. p. 1453.
 [9] AD/A060221
 [10] 陈东波, 魏择斌; 《红外技术》, 1986, 8, No. 5, p. 21.
 [11] W. Wetters. Tein, J. O. Fontannella, A. R. Newberry, J. Baars; *Optica Acta* 1982, 29, p. 41~50.

A study of threshold LLL-CCD cameras

WEI ZEBIN ZOU YISONG

(Beijing Institute of Technology, Optic Engineering Department)

(Received 18 November 1987; revised 8 February 1988)

Abstract

A concept of TV-signal to noise ratio transfer function (SNTF) is proposed in this paper, and a detective equation is established based on the SNTF. Theoretical calculated results well coordinate with the experimental results. Values of detectivity of LLL-CCD cameras under several different conditions are calculated based on the equation with the aid of computer. After analysis of the results, some ways of improving detective ability of LLL-CCD are proposed.

Key words: CCD, CCD Image sensor, characteristics of low light level.