

CCPD-1024 器件的 MTF_i 实验值的测试

原芸

(华中工学院生物工程系)

摘要——线列 CCD MTF_i (积分调制传递函数)是衡量该器件成像性能好坏的重要参数之一。以狭缝象扫描的方法,测得了 CCPD-1024 器件在“刷扫”重迭率趋于无穷大时的 MTF_i 。 MTF_i 的实验值与理论值相比,在列阵方向差别较大,而在列阵垂直方向较为接近。在“刷扫”工作状态下计算 CCPD-1024 器件的 MTF_i 值,结果表明:线列 CCD 的“刷扫”重迭率 ξ 取 1~2 较为合理。

MTF_i 是 CCD 器件三个调制传递函数中比较重要的一个函数,它的实验值对评价、研究 CCD 的性能,制造、挑选和使用 CCD 都很有帮助。我们以美国 Reticon 公司生产的 CCPD-1024 器件为样品,测试了它的 MTF_i 。

一、实验方案与装置

根据文献[1]中的式(11)和式(13)有:

$$MTF_i(f_x, f_y)|_{\text{刷扫}} = \left| \frac{R(f_x, f_y)}{R(0, 0)} \right| \cdot \text{sinc}\left(\frac{b}{\xi} f_y\right), \quad (1)$$

式中, x, y 分别代表线列 CCD 的列阵方向和“刷扫”方向; ξ 为“刷扫”重迭率; $R(f_x, f_y)$ 为线

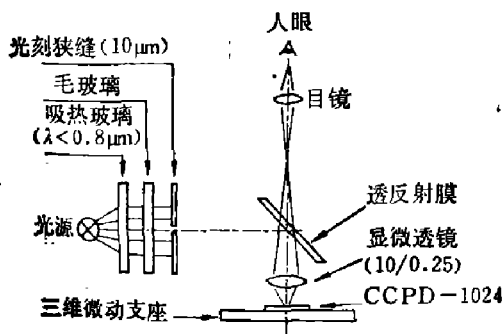


图1 空间响应函数测试仪的光路示意图

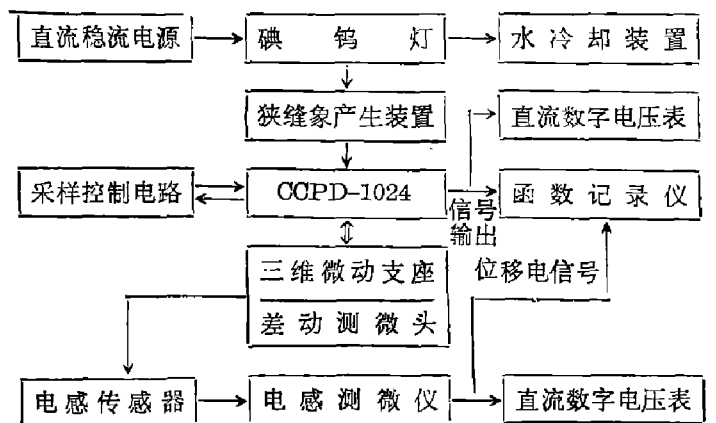


图2 实验装置联接框图

本文 1983 年 12 月 6 日收到。

列 CCD 单个光敏元的空间响应函数 $R(x, y)$ 的频谱函数; b 为光敏元在“刷扫”方向的窗口尺寸。

从式(1)可以看出,如能获得线列 CCD 器件单个光敏元的 $R(x, y)$, 即可得到该器件的 $MTF_i(f_x, f_y)|_{\text{刷扫}}$ 。为此,设计了一台空间响应函数测试仪,图 1 是它的光路示意图;图 2 是实验装置联接图。

二、实验结果与分析

式(1)是以线列 CCD 各光敏元的空间响应函数基本一致为前提推导出来的。我们任意取 CCPD-1024 器件四个光敏元,其光敏元列阵参数为: 单个光敏元窗口尺寸 $a \times b = 9.6 \times 16 \mu\text{m}^2$; 光敏元间隔 $d = 16 \mu\text{m}$; 取尼奎斯频率 $f_N = \frac{1}{2d} \doteq 31.25$ 对线/mm。分别测试它们在 x 和 y 方向的一维空间响应函数 $R(x)$ 和 $R(y)$, 以便检查光敏元列阵的均匀程度。

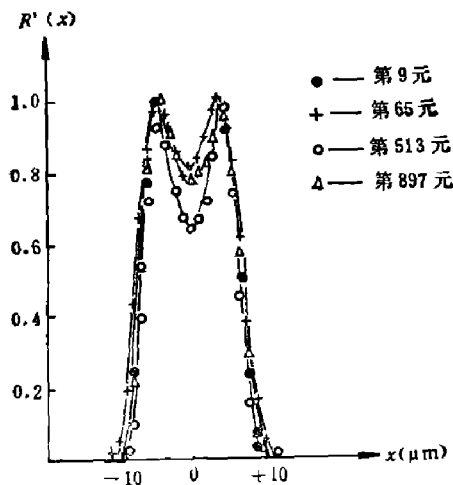


图 3a CCPD-1024 器件四个不同光敏元在列阵方向上的一维空间响应函数(含狭缝象影响)

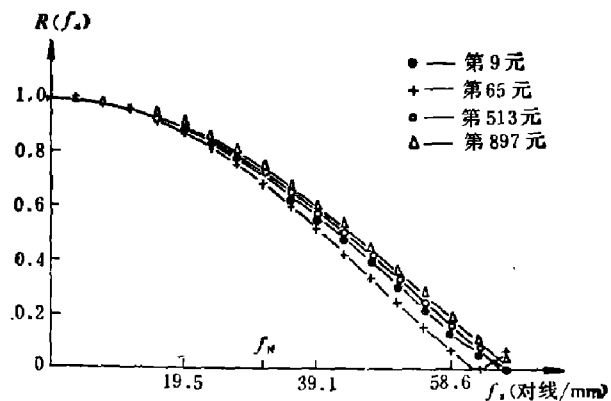


图 3b CCPD-1024 器件四个不同光敏元在列阵方向上的一维空间响应函数的频谱函数

1. 四个光敏元的空间响应函数及其频谱

以 $0.5 \pm 0.03 \mu\text{m}$ 为取样间隔,在 x 和 y 方向上分别测得 CCPD-1024 器件光敏元列阵的第 9 元、第 65 元、第 513 元和第 897 元的一维空间响应函数 $R'(x)$ 、 $R'(y)$ [即含狭缝象影响的 $R(x)$ 、 $R(y)$], 分别见图 3a 和图 4a; 相应的频谱函数 $R(f_x)$ 、 $R(f_y)$ (不含狭缝象影响) 分别见图 3b 和图 4b。

从图 3a、图 4a 中可知,光敏元的 $R(x)$ 、 $R(y)$ 基本上是偶函数,但不是标准的矩形函数。从图 3b 和图 4b 看,各元的频谱函数在 $f < f_N$ 以内也是比较接近的。至于 $R'(x)$ 、 $R'(y)$ 顶部的中心下凹现象,很可能是由于当同一光强的狭缝象在光敏元面上移动时,光敏元的 PN 结收集在它附近产生的光生少数载流子的数目大于在光敏元中心产生的光生少数载流子数目而造成的。

2. 实验值与理论值的比较(见图 5a 和图 5b)

在理论上,常把 CCD 光敏元的空间响应函数视为 $R(x, y) = \text{Rect}\left(\frac{x}{a}\right) \cdot \text{Rect}\left(\frac{y}{b}\right)$, 因而它的 $MTF_i(f_x, f_y) = \text{sinc}(af_x) \cdot \text{sinc}(bf_y) \cdot \text{sinc}\left(\frac{b}{\xi} f_y\right)$ 。

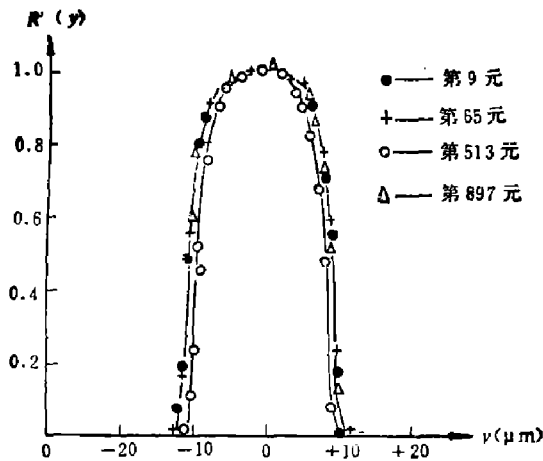


图4a CCPD-1024 器件四个不同光敏元在垂直列阵方向上的一维空间响应函数(含狭缝象影响)

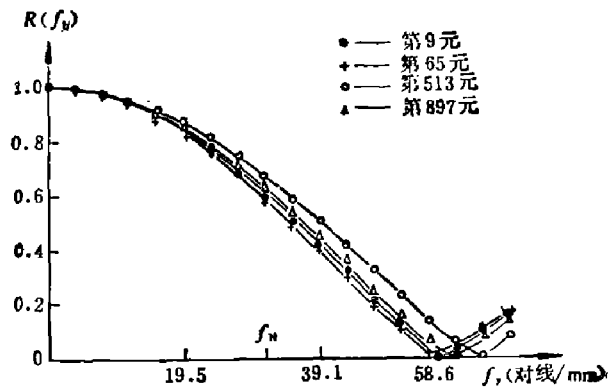


图4b CCPD-1024 器件四个不同光敏元在垂直列阵方向上的一维空间响应函数的频谱函数

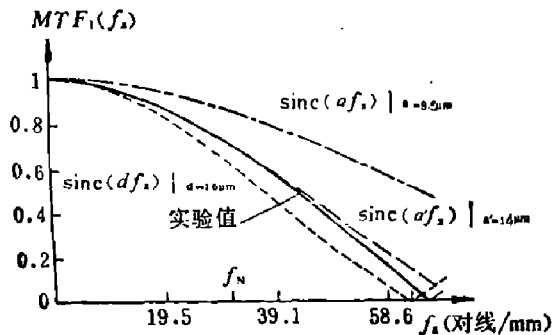


图5a CCPD-1024 器件 MTF_1 实验值与理论值的比较(在列阵方向)

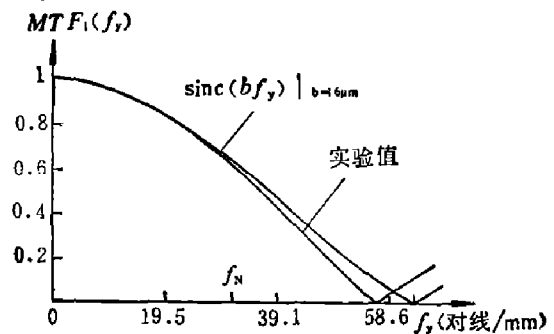


图5b CCPD-1024 器件在“刷扫”重迭率趋于无穷大时的 MTF_1 的实验值与理论值的比较(在垂直列阵方向上)

由图 5a 和图 5b 可以看到, 在 y 方向, 理论值与实验值比较接近; 在 x 方向, 实验曲线介于 $\text{sinc}(af_x)$ 和 $\text{sinc}(df_x)$ 两曲线之间, 这是因为光敏元的空间响应函数 $R(x)$ 的宽度介于 a 与 d 之间。由此可见, 在 x 方向用 $\text{sinc}(df_x)$ 代替 $\text{sinc}(af_x)$ 来估算 $MTF_1(f_x)$, 其值一般不会超过实验值。

3. “刷扫”重迭率 ξ 对 $MTF_1(f_y)$ 的影响(见图 6)

根据式(1), 并令 $f_x=0$, 则有

$$MTF_1(f_y)|_{\text{刷扫}} = R(f_y) \cdot \text{sinc}\left(\frac{b}{\xi} f_y\right) \quad (2)$$

y 方向上的尼奎斯频率 $f_{N,y}$ 为

$$f_{N,y} = \frac{1}{2 \cdot (y \text{ 方向采样间隔})} = \frac{\xi}{2b} = \xi f_{N0} \quad (3)$$

上式第二步可参见文献[1]。

从图 6 中可以看出, $\xi > 2$ 时, 对 $f_y < 2f_N$ 的 $MTF_1(f_y)|_{\text{刷扫}}$ 的作用不大; 而 $\xi < 1$ 时, 会使 $MTF_1(f_y)|_{\text{刷扫}}$ 急剧变坏。当然, ξ 不同, 相应的 $f_{N,y}$ 也不同。从使用角度上看, 对象质的要求是, 当 $f_y < f_{N,y}$ 时, $MTF_1(f_y)|_{\text{刷扫}}$ 应愈大愈好^[2]。同时, 还希望 $f_{N,y}$ 尽可能大一点。

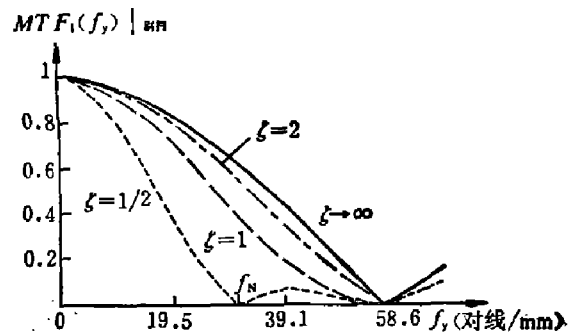


图6 CCPD-1024 器件在“刷扫”重迭率 ξ 不同时的 MTF_1 (在“刷扫”方向)

对工作效率而言, ξ 不应太大。由此看来, ξ 选 1~2 比较合适。

4. 误差分析

D. H. Seib^[3] 以实验为基础指出, CCD 器件仅仅对那些入射光的渗透深度大于耗尽区宽度的长波($\geq 0.8 \mu\text{m}$)而言, 才有扩散调制传递函数的下降。图 1 中的吸热玻璃片正是为吸收光源中的近红外辐射而设置的。在加吸热玻璃片($\lambda < 0.8 \mu\text{m}$)和加窄带滤光片($\lambda = 0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$)两种滤光条件下, 测得同一元的 $R(f_x)$ 是一致的。这说明吸热玻璃确实吸收了光源中的近红外辐射, 避免了扩散调制传递函数对实验数据的影响。

由于是测单个光敏元的 $R(x)$ 或 $R(y)$, 每次取样时同一光敏元的电荷包都是沿同一路径传输, 加之 CCPD-1024 器件转移效率的高稳定性, 因而可以忽略转移调制传递函数的影响。

在测某一光敏元的 $R(x)$ 或 $R(y)$ 时, 取样间隔误差 ($< \pm 0.03 \mu\text{m}$) 和电噪声会使实验产生随机误差。另外, 由于 1024 个光敏元的空间响应函数不可能完全一致, 那么任意取某一光敏元的 $R(f_x)$ 、 $R(f_y)$ 代入式 (1) 计算 $MTF_i(f_x, f_y)|_{\text{测}}$ 的结果也要产生随机误差。同时考虑两因素的影响, MTF_i 数据在 $f_x = f_N$ 处的均方差值是该处的 $MTF_i(f_x)$ 值的 3.6%, 在 $f_y = f_N$ 处的均方差值是该处 $MTF_i(f_y)$ 值的 5.3%。

三、结 论

由于可以排除扩散调制传递函数和转移调制传递函数的影响, 且各光敏元的空间响应函数基本一致, 通过测试一个光敏元的空间响应函数而获得 CCPD-1024 器件在“刷扫”重迭率很大时的 MTF_i 的方法是可行的。

通过测试可知, CCPD-1024 器件光敏元的空间响应函数 $R(x)$ 、 $R(y)$ 基本上是偶函数, 但不是理想的矩形函数。

利用光敏元列阵尺寸参数 $d \times b$ 来计算 CCPD-1024 器件的积分调制传递函数 $MTF_i(f_x, f_y) = \text{sinc}(df_x) \cdot \text{sinc}(bf_y) \cdot \text{sinc}\left(\frac{b}{\xi} f_y\right)$, 在 $f_x, f_y \leq 2f_N$ 时, 一般不超过实验值。

从成像质量和工作效率上综合考虑, CCPD-1024 器件的“刷扫”重迭率 ξ 因子选 1~2 比较合适。

致谢——中国科学院上海技术物理研究所黄克义同志为本实验提供了空间响应函数测试仪等条件并给予具体指导。在本实验和本文撰稿过程中, 还多次得到上海技术物理研究所匡定波、丁世昌、叶人超、郑元林、褚家栋、吴一彦等同志和华中工学院张守一、张赫钢两位同志的热情指导和大力帮助。在此一并致以衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] 原芸, 红外研究, 4(1985), 1:25~28
- [2] Barba D. F. and Compana S. B., *Advances in Images Pickup and Display*, Academic: New York, Vol. 3, 1977, 247~250.
- [3] Seib D. H., *IEEE Trans.*, ED-21 (1974), 212.

MEASUREMENT FOR THE INTEGRATION MTF_i OF THE CCPD-1024 DEVICE

YUAN YUN

(Department of Biomedical Engineering, Huazhong University of Science and Technology)

ABSTRACT

The integration modulation transfer function MTF_i of the linear COD array is one of the important parameters for evaluation of the imaging quality of the device. The MTF_i of a CCPD-1024 device with a rate of pushbroom overlapping ξ which tends to infinity is measured by using narrow-seam light-source scanning. The differences between the experimental values and the theoretical ones are larger along the direction of array and smaller in the direction perpendicular to the array. The result of calculated MTF_i values of the CCPD-1024 device in pushbroom mode shows that ξ seems more reasonable when it is chosen as 1~2.