

# 一种利用 CCD 测量像增强器 MTF 的方法研究

皇甫俊 贾欣志 李集田

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 线性光学系统的光学调制传递函数(MTF)可由线扩散函数(LSF)的傅立叶变换求出。根据这一基本原理,提出了一种利用 CCD 测量像增强器 MTF 的新方法。与其它传统的测试方法相比,该方法具有结构简单、使用方便,并可用微机进行数据处理等优点。所建立的测试系统用 CCD 作为光电转换元件,对接收到的 LSF 光强信号进行视频放大、同步分离、采样保持、A/D 变换,最后通过接口电路将数据送入微机,通过软硬件的结合,可以方便地、实时地测得像增强器的 MTF。测试结果与事实相符合,还对影响测试精度的若干因素进行了分析与讨论。

**关键词:** 像增强器; 调制传递函数; CCD 摄像机

## 1 概述

自 1962 年美国研制出第 I 代像增强器以来,像增强技术得到了迅速的发展。现在,像增强器已广泛地用于各个领域。像增强器的像质评价不论对像增强器的性能改进还是对像增强器系统应用都是很重要的。调制传递函数作为像质评价的手段,能更全面、客观地反映成像系统的成像质量,对像增强器而言,它能很好地反映出器件的分辨率性能。本研究工作就是用傅立叶光学理论为基础,通过 CCD 与微计算机相结合来测量像增强器的 MTF。

## 2 像增强器 MTF 的不同测量方法

### 2.1 利用正弦波测试卡

这一方法需要能产生正弦波信号的测试卡,即测试卡上各种空间频率的黑白条纹的灰度分布,必须准确地按正弦函数规律变化,因此所需的正弦波测试卡不易做,另外需用机械方法移动正弦波测试卡,而且每一次只能测某一空间频率上的 MTF 值。

### 2.2 利用方波测试卡

此方法与利用正弦波测试卡的测量方法相似,只不过用方波测试卡代替正弦波测试卡而已,这样测得的实际上是对比传递函数即 CTF。CTF 与 MTF 间可以相互转化。方波测试卡虽然好做,但也需机械扫描,而且需逐点测 MTF,另外需通过公式转换才能得 MTF。

### 2.3 OTI 方法

这种方法是将狭缝成像于被测像增强器的输入光电阴极上,而相应的荧光屏上的狭缝的扩展像被成像于一个可转动的测试图样上,此图样中含有不同空间频率的长条,每根条纹与输入细缝像卷积,在这个制作于圆柱形面上的测试图样之后,放置一个光电倍增管,其输出电流与通过测试图样的光通量的累积值成正比。输出信号电流为狭缝像与正弦波的卷积,这个积分正是待测像增强器对狭缝像响应的傅立叶变换。也就是在不同空间频率下电信号幅值,即 MTF。此方法也需机械方法转动正弦波测试卡。

### 2.4 用矩形光栅之类的目标板代替正弦板,用电学方法滤去高次谐波的光电傅立叶分析法。

这种方法可很明显地减小由于产生正弦波而引起的各种问题。这种系统是对方波光栅进行成像,对像空间获得的电信号,进行带通滤波从而只抽取其中的正弦基波成分。这种方法也需机械移动光栅板,且需电路来滤去高频部分,因而仪器显得复杂。

## 3 用 CCD 测量 MTF 的数学模型

扫描法测量 MTF 的理论根据是

$$\text{OTF}(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \text{PSF}(u', v') \exp\{-i2\pi(f_x u' + f_y v')\} du' dv'$$

$u', v'$  为参考像面的坐标,  $f_x, f_y$  分别是沿  $u', v'$  方向上的空间频率。PSF 为点扩散函数。为了测量方便,可将它简化为一维来计算

$$\begin{aligned} \text{OTF}(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \text{LSF}(x) \exp(-i2\pi f_x x) dx \\ &= \text{MTF}(f) \cdot \exp[i\text{PTF}(f)] \end{aligned}$$

LSF( $x$ ) 为线扩散函数, MTF( $f$ ) 是调制传递函数, PTF( $f$ ) 是位相传递函数。上式表示,在非相干照明的条件下, MTF 为 LSF( $x$ ) 的傅立叶变换的模量。无限窄的狭缝经像增强器所成的像就是线扩散函数, LSF( $x$ ) 为线像的光强分布。

CCD 摄像机具有自动采样和自动扫描的特点,用 CCD 摄像机接收 LSF( $x$ ),然后对得到的离散采样数据 LSF( $x_k$ ) 作傅立叶变换便可得到 MTF( $f$ )。LSF( $x_k$ ) 是用 CCD 摄像机扫描狭缝像时,以 CCD 的单元间距  $\Delta x$  将 LSF( $x$ ) 采样到的数值。

在测量仪器中以宽度为  $3\mu\text{m}$  的狭缝为目标物,紧贴于被测的像增强器光电阴极面,像增强器荧光屏上所成的像即为单缝的扩展像,通过照相机镜头将此扩展像再成像于 CCD 摄像机上。我们选用 MTV-1881CB 摄像机。摄像机光敏单元中心距为  $8\mu\text{m}$ 。由于照相机镜头的放大作用,实际可测的极限为  $\gamma_s = \gamma_f \cdot A$ , 其中  $A$  为放大倍数。

## 4 像增强器 MTF 测量系统

像增强器 MTF 测量系统由照明系统、狭缝、像增强器、工作台、成像系统、CCD 摄像机、接口电路、同步分离电路、监视器、微机、打印机等部分组成,其结构示意图如图 1 所示。

系统中照明系统提供测量系统所需的非相干平行光。狭缝为缝宽  $3\mu\text{m}$  的单缝,紧贴于像增强器光电阴极面上。狭缝通过像增强器在其荧光屏上所成的像即为狭缝的扩展像。扩展像

的光强分布为线扩散函数  $LSF(x)$ 。成像系统把像增强器荧光屏上的狭缝的扩展像放大成像到 CCD 摄像机。CCD 摄像机作为光电转换传感器。显示器可监视 CCD 摄像机所接收的像增强器扩展像的位置及方向。CCD 摄像机的输出信号为全电视信号,它包括视频信号,同步信号及消隐信号等。因此需从全电视信号中提取视频信号

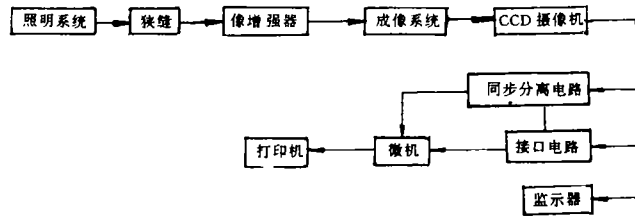


图 1 像增强器 MTF 测量系统结构示意图

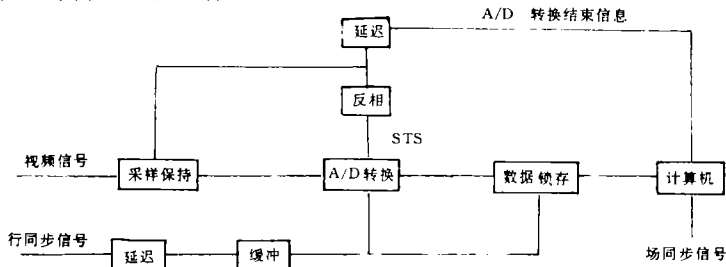


图 2 微机接口电路设计框图

部分提供给 AD574 做 A/D 转换。因 CCD 摄像机输出的信号很弱,需放大视频信号。因此,设计了视频放大电路。

采样保持, A/D 转换及计算机采样,需行、场同步信号控制。因此需从全电视信号中分离出行同步信号与场

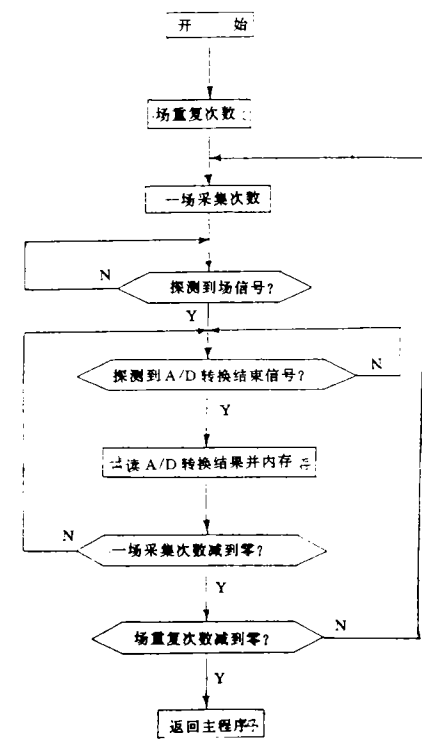


图 3 采样子程序流程图

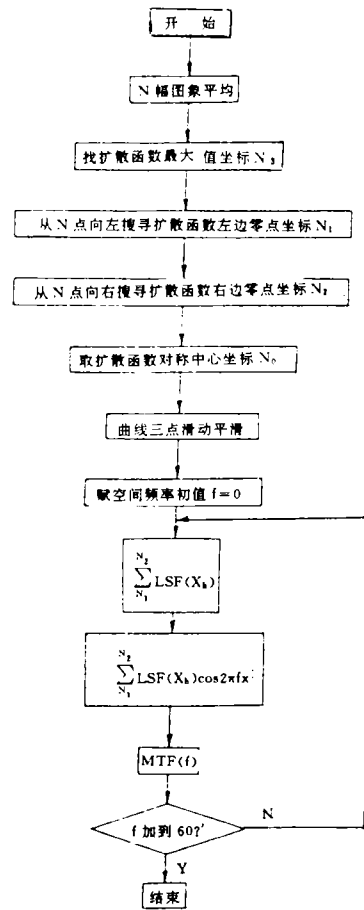


图 4 主程序流程图

同步信号。这可由从全电视信号中先分离出复合同步信号,再经积分电路可分离出场同步信号,经微分电路即可分离出行同步信号。因计算机软件探测行同步信号的时间为  $6.3\mu s$ ,因此行同步信号延迟脉冲宽度设计成  $7\mu s$ 。

微机接口电路设计框图如图 2 所示。

若在行方向上取狭缝的像点,则要求计算机采样速度相当快。而在场方向上取狭缝的像点,则每隔  $64\mu s$  采样一次即可,通过计算机软件的编程可容易实现。我们在设计中水平地放置狭缝,于是 CCD 摄像机所接受的信号在场方向为狭缝缝宽方向的扩展像。这样每隔一行采一次样,即可得到狭缝扩展像的光强分布信号。

系统主程序由 BASIC 语言编程,而采样子程序用 8088 汇编语言编写。采样子程序及主程序流程分别如图 3,图 4 所示。

### 5 测试结果及分析讨论

在 MTF 的测量中,我们所测得的 MTF 实际上是像增强器+照相机镜头+CCD 摄像机的整个系统的 MTF,根据传递函数理论:

$$MTF = MTF_1 \cdot MTF_2 \cdot MTF_3$$

$$MTF_1 = MTF / (MTF_2 \cdot MTF_3)$$

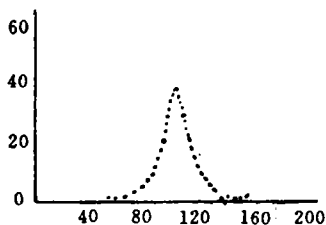


图 5 第 I 代微通道板+照相机镜头+CCD 摄像机扩散函数曲线

因此像增强器本身的 MTF 为所测得的系统的 MTF 值除上照相机镜头+CCD 摄像机的 MTF 值。而照相机镜头+CCD 摄像机的 MTF 由下述方法测得,把单缝直接通过照相机镜头放大成像到 CCD 摄像机上,所测得的 MTF 即为照相机镜头+CCD 摄像机的 MTF。

我们分别对第 I 代单级像增强器,第 I 代三级级联式像增强器,第 I 代微通道板像增强器进行了测量。第 I 代单级像增强与第 I 代三级级联式像增强器所测结果,其截止空间频率分别为  $52lp/mm$ ,  $19lp/mm$ ,与实际符合。第 I 代微通道板像增强器的扩散函数及 MTF 曲线如图 5、图 6 所示。

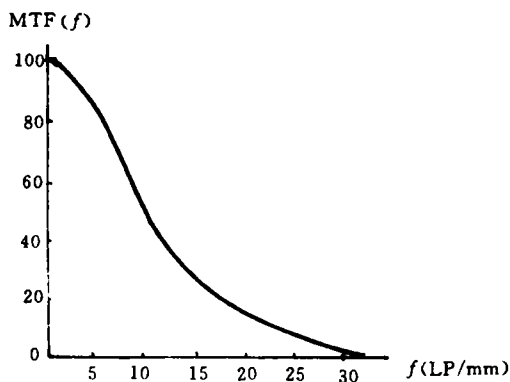


图 6 第 I 代微通道板+照相机镜头+CCD 摄像机 MTF 曲线

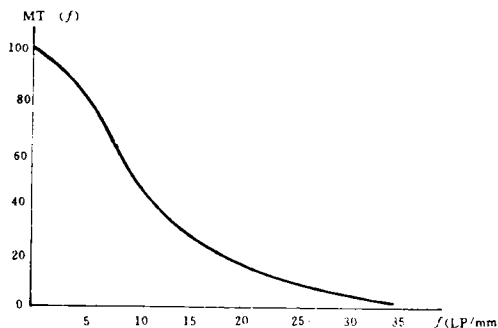


图 7 第 I 代微通道板像管修正之后的 MTF 曲线图

修正之后的 MTF 曲线如图 7 所示。

第 I 代微通道板像增强器截止空间频率为  $31lp/mm$ 。此值与俄罗斯测试结果  $32lp/mm$  非

常接近。

测试结果的重复性可由第 I 代三级级联式像增强器来说明,其 5 次测量结果如表 1 所示,每次测量还是比较稳定。

表 1

	I	II	III	IV	V
$f$ (lp/mm)	MTF( $f$ ) (%)	MTF( $f$ ) (%)	MTF( $f$ ) (%)	MTF( $f$ ) (%)	MTF( $f$ ) (%)
0	100	100	100	100	100
1	98	98	98	98	98
2	94	94	94	94	93
3	87	87	87	86	86
4	78	78	78	77	76
5	68	68	68	67	65
6	57	57	57	56	54
7	47	47	46	45	44
8	37	37	37	35	34
9	28	28	28	27	27
10	21	21	21	21	20
11	16	16	16	16	16
12	12	12	12	12	13
13	9	10	9	10	11
14	8	8	7	8	9
15	6	7	6	7	8
16	5	6	5	6	6
17	4	5	4	5	5
18	4	4	3	4	4
19	3	3	2	2	2
20	2	2	1	1	1

对于 MTF 测量结果影响因素可归纳如下几点:

(1)在 MTF 的计算公式中余弦因子为  $\cos(2\pi fx)$ ,而

$$x = \frac{4.8}{596} \times 2(N - N_0) / A = 16 \times 10^{-3} (N - N_0) / A$$

其中  $N$  为采样点坐标,  $N_0$  为扩散函数中心坐标。  $A$  为照相机镜头的放大倍数,由此可见照相机镜头的放大倍数  $A$  的准确与否,将直接影响 MTF 的测量结果。

(2)在测量中狭缝的扩展像很窄,需照相机镜头放大成像在 CCD 摄像机上,当照相机镜头的放大倍数越大,扩展像在 CCD 摄像机上所占的像素越多,测量结果越准。但放大倍数高,则 CCD 摄像机上的照度越低,因此放大倍数不宜高。但放大倍数太低,则 CCD 摄像机上所占像素就减少,测量结果越不准。特别是测量极限分辨率较高的像增强器时,因其扩散函数较窄,这一现象较明显。而且 CCD 摄像机本身的噪声给 MTF 的测量带来了一定的影响。

## 6 结 论

本系统在进行像增强器 MTF 测试时,避免了以往机械扫描及制作正弦光栅的困难,充分利用了 CCD 本身的自动采样及自动扫描的特点,使测量系统大大简化。本测量系统适合于测量极限分辨率较低的像增强器的 MTF。每次测量结果可存于软盘,这样便于日后的查核和使用。

## 参 考 文 献

- [1]冯焱焱等,像管的设计与分析.国防工业出版社,1990
- [2]沈庆垓,摄像管理论基础.科学出版社,1984
- [3]Illes P. Csorba, Modulation Transfer Function (MTF) of Image Intensifier Tubes. Proc. SPIE 1981, 274
- [4]I. P. Csorba, Resolution Limitations of Electro-magnetically Focused Image Intensifier Tubes. RCA Review, 1969, 30(1):36
- [5]H. K. 依格纳齐也夫,电视学.高等教育出版社,1957
- [6]曾田纯夫,电视接收机的电路设计.科学出版社,1974
- [7]竹村裕夫,CCDカメラ技术.技术社,1976

### Study on Method of Measuring MTF for Image Intensified Tube by Using CCD

Huang Pujun, Jia Xinzhi and Li Jitian

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of sciences, Changchun 130022)

#### Abstract

The optical transfer function (OTF) of a linear optical system can be derived by the Fourier transformation of the linear spread function (LSF). In this paper, a new way to measure the modulation transfer function (MTF) of an image intensified tube with a charge-coupled device (CCD) camera is presented. Compared with the other conventional systems, this method has the advantages of simple structure, easy operation and capability of data processing with a computer, etc. In the measuring system a CCD camera is used as an opto-electronic converter. The intensity signal of the LSF got from the camera is video-amplified, synchronously-separated, sampled and kept, A-D converted, and finally sent to a computer through an interface circuit. With the combination of both software and hardware, we can obtain the MTF of an intensified tube in the real time easily.

**Key words:** Image intensified tube, Modulation transfer function, Charge-coupled device CCD camera