

# 用于计算全息激光扫描系统\*

应莹同 夏绍丰 贾玉润 章志鸣

(复旦大学激光物理研究室)

## 提 要

本文报导了用激光扫描系统直接绘制计算全息滤波器的研制情况及初步实验结果。该系统采用 Burckhardt 编码方式能直接绘制出约为  $10 \times 10 \text{mm}^2$  的计算全息图,每一采样孔为  $10 \times 20 \mu^2$ ,全息图的空间带宽积可达  $1024 \times 512$ ,每一采样元有 7 bit 灰阶,总信息容量为  $6 \times 10^7$ ,绘制时间为 17 分钟。

## 一、引 言

在光信息处理研究中,滤波器的制备十分重要,一般较为简单的方法是利用 Lohmann<sup>[1]</sup> 计算全息图来再现滤波函数。但是绘制计算全息图需利用计算机控制的绘图仪或飞点扫描示波器及设备及照相精缩等步骤,故手续繁复,制备周期长。若计算全息的编码方式采用 Burckhardt<sup>[2]</sup> 编码方式,即以不同灰阶的等间距的取样孔为其编码,则计算全息滤波器可以采用李星海(S. H. Lee)<sup>[3]</sup> 提出的激光扫描方法直接绘制,而无需照相缩小等步骤。但这一激光扫描系统仍需要较高质量的光学元件及微处理机等设备。

我们实验室改进了激光扫描系统的光路安排,使之采用一般的光学元件仍能满足绘制计算全息图的要求,并且采用国产的 CMOS 集成电路研制成扫描控制系统,具有控制曝光时间及扫描找址的组合功能,该系统采用 Burckhardt 编码方式能直接绘制出约为  $10 \times 10 \text{mm}^2$  的计算全息滤波器,采样孔为  $10 \mu \times 20 \mu$ ,像素元尺寸为  $60 \mu \times 40 \mu$ ,全息图的空间带宽积可达  $1024 \times 512$ ,并且每一采样元可以有 7 bit 的灰阶,所以信息容量约有  $6 \times 10^7$ 。经计算机运算的滤波函数分布,用纸带及光电机馈入扫描系统后绘制一幅计算全息滤波器约需 17 分钟。经这一系统所绘制的计算全息滤波器,在光信息处理系统中进行初步的滤波试验、性能良好。

## 二、计算全息的编码原理及要求

计算全息图的绘制实际上并不需要明显地将载波频率计算在内,所以只要把像素元上的振幅及位相值进行编码成实数值的表述,对于采用 Burckhardt 的编码方式,在每一像素元中以光栅形式等间隔地采取三个开孔,相当于在沿  $x$  方向的光栅上,相邻开孔之间有  $2\pi/3$  的位相差。由于任一复数量可以在复平面上分解为沿位相差为  $2\pi/3$  的三个单位矢  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  上的正分量:

收稿日期:1981年9月9日

\* 本文已于 1981 年 6 月在美国华盛顿召开的“激光与电子光学”会议(CLEO'81)上宣读。

$$A(x, y)\exp[i\phi(x, y)] = \alpha_1 A_1(x, y) + \alpha_2 A_2(x, y) + \alpha_3 A_3(x, y)。 \quad (1)$$

因此三个开孔的振幅透射系数可以与  $A_1$ 、 $A_2$  及  $A_3$  的值相对应, 并且经变换后在衍射角  $\alpha$  方向上可以复现原来的复数量  $A(x, y)\exp[i\phi(x, y)]$ ,  $\alpha$  值为  $\alpha = \sin^{-1}\lambda/U$ , 式中  $U$  为象素元在  $x$  方向上的周期,  $1/U$  即为象素的采样频率。故 Burekhardt 编码全息图的数学表达式为

$$H(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \sum_{l=1}^3 A_{mnl} \exp\left[i(l-1)\frac{2\pi}{3}\right] \text{rect}\left\{\frac{x - [3m + (l-1)]U/3}{U/6}\right\} \text{rect}\left[\frac{y - nV}{V/2}\right], \quad (2)$$

其中下标  $m$ 、 $n$  代表采样象素的地址码,  $V$  为象素元在  $y$  方向上的周期,  $l$  为每一象素中三个采样孔的序号。用平面波垂直照射该全息图, 可在衍射角为  $\alpha$  的一级光波中重现离散化了的原滤波函数的波面。再者, 在(1)式中的复数量实际上最多只有两个分量不为零, 所以每一个象素元  $U \times V$  的面积中只存在着两个不同灰阶的开孔, 这两个开孔可以复现出  $A(x, y)\exp[i\phi(x, y)]$  的全部信息。

由于  $1/U$  是所需要的滤波函数  $A(x, y)\exp[i\phi(x, y)]$  的离散化的采样频率, 所以它与滤波函数本身的频带宽度有关, 对于过稀的采样, 将使滤波函数的复现时出现混迭效应, 损失其细致结构, 对于过密的采样则将增大其衍射角而影响最后的光强大小。一般来说, 通常取载波频率为 20 line/mm 左右。在我们的全息滤波器中,  $U = 60\mu$ , 即载波频率约为 17 line/mm, 每一象素中的采样孔宽度为  $10\mu$ , 即等于  $U/6$ , 所以各采样孔之间的光栅常数为  $20\mu$ , 这是最简单的结构, 而且也便于采用等间距的扫描方法绘制, 对于这类结构的各开孔均为透明的理想状态, 其第一级上的衍射效率约为 10%。

由于载波与  $x$  方向的光栅周期有关, 所以  $y$  方向的开孔高度并不影响滤波的效果, 但却与总体的透射光强有关, 在我们的滤波器中,  $V = 40\mu$ , 而每一开孔的高度为  $V/2 = 20\mu$ 。

根据以上的参数, 可以看出采用激光扫描方法以绘制面积达  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  的计算全息滤波器是十分有利的, 因为若是采用常规的绘图仪绘制具有同样空间带宽积的全息图, 设绘图仪的最小绘线宽度为 1 mm, 则绘制的版面将需要  $1 \times 1 \text{ m}^2$  并且还需要精缩 100 倍, 同样若是采用飞点显象管绘制, 若飞点管的萤光屏为  $10 \times 10 \text{ cm}$  则其分辨线条应为  $100\mu$ , 并且也还是要再精缩 10 倍。

### 三、激光扫描系统的光路设计

由于 Burekhardt 编码是类似于光栅式的等间距线段结构, 所以其绘制可以采用激光扫描的办法。使一激光束先通过一台声光开关器后照射在  $0.32 \text{ mm} \times 0.64 \text{ mm}$  的矩形物孔上, 此物孔经过光学系统而在照相物镜的象面上形成缩小的象, 要求象的尺寸为计算全息采样孔所需要的尺寸, 即为  $10\mu \times 20\mu$ , 若是在光路的适当位置上安放两只由电流计驱动的扫描转镜, 光束经转镜反射后可以改变在象面上的成象位置, 所以逐次地改变两只扫描转镜的偏转角度以及在各偏转角度下开启声光开关使激光束通过而进行曝光, 就可以获得具有不同灰阶的象素元的二维计算全息图, 扫描转镜的位置以及开启声光开关的曝光时间

都可以用一电子学系统按计算机所算得的数据予以控制。

所以, 激光扫描系统的光路设计应考虑使物孔缩小成象, 适当地安放扫描转镜的位置并使象面上各象素的成象质量符合一定的要求。图 1 是根据上述要求所安排的光路, 其中  $L_1$  及  $L_2$  组成远心系统,  $L_1$  的焦距为  $f_1=960\text{ mm}$ ,  $L_2$  的焦距为  $f_2=120\text{ mm}$ 。这一系统将使物孔  $A$  在  $L_2$  的后焦面上形成缩小 8 倍的象。若在  $L_2$  的前焦面附近放二维电流计转镜, 则当转镜扫描时, 可在  $L_2$  的后焦面上形成阵列的初缩象, 我们在  $L_2$  后焦面上, 即在阵列初缩象的象面上再放一块场镜  $L_3$ , 而在场镜后焦面上放照相物镜  $L_4$ , 则在  $L_4$  的象面上又形成一幅缩小 4 倍的阵列精缩象, 这就是我们需要的采样孔阵列。场镜的作用是使每次扫描成象光束都能折入到照相物镜的

孔阑中心(图 2), 这样可以降低照相物镜的相对孔径, 同时, 进入照相物镜的成象光束与主轴的张角也相应减小, 因而可以保证成象质量。

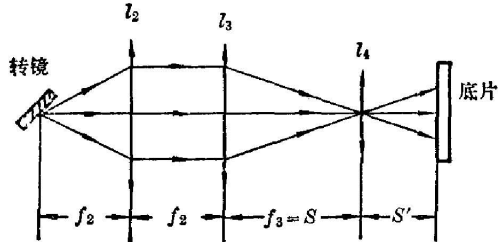


图 2 场镜作用原理图

Fig. 2 Function of the field lens

孔阑中心(图 2), 这样可以降低照相物镜的相对孔径, 同时, 进入照相物镜的成象光束与主轴的张角也相应减小, 因而可以保证成象质量。上述的光学系统与国外扫描系统<sup>[3,4]</sup>相比有两个不同之处, 即我们采用了两步缩小的方式并增加了一块场镜; 而国外系统只采取一步缩小的方式, 即相当于我们的远心系统部分, 虽然光路简单, 但由于缩小倍率很大, 故  $L_2$  的焦距很短, 又由于进入  $L_2$  的扫描光束张角较大, 且每次扫描光束不断在  $L_2$  的孔阑上改变位置, 因而需要价格昂贵的相对孔径很大的短焦距物镜 ( $f/1:1.2$ )。而我们并不具备这个条件, 在我们的系统中,  $L_2$  的相对孔径要求为  $f/1:3$ , 它是一个初缩镜头, 但为了保证成象质量, 我们实际用的是  $f/1:2$  物镜。对于  $L_4$  我们用的是 DF-7 型照相物镜,  $f_4=58\text{ mm}$ , 相对孔径也为  $f/1:2$ , 实际上只需要  $f/1:3.5$  就够了。

我们所采用的电流计转镜, 使最大偏角为  $\pm 7^\circ$ , 反射镜面积为  $8 \times 10\text{ mm}^2$  或  $7 \times 7\text{ mm}^2$ , 两块转镜之间的距离为  $8.5\text{ mm}$ , 由于转镜的面积很小, 它是整个光学系统的孔径光阑, 所以转镜的线度将起低频滤波器作用, 它所截取物孔  $A$  的空间频谱宽度将直接影响采样孔最后的成象质量。图 3 表示转镜面积复盖不同频带宽度时, 物孔  $A$  在照相物镜象面上的光强分布, 很明显, 转镜面积越大, 则所复盖的频带越宽, 因而物孔  $A$  的象越接近一个矩孔函数。若反射镜复盖频谱的  $\pm 1$  级边带, 由它绘制的计算全息图, 其采样孔的象差还是比较好的。实际上, 我们认为反射镜至少应复盖整个零级谱, 其象质在所绘制的滤波器中似不应引起严

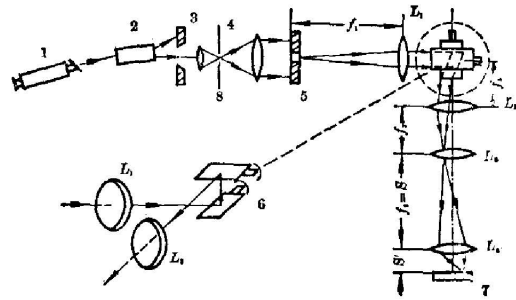


图 1 激光扫描光学系统光路原理图

1—He-Ne 激光器; 2—声学光开关; 3—小孔光阑; 4—针孔; 5—物孔; 6—x-y 电流计转镜; 7—感光底片; 8—激光扩束及准直

Fig. 1 Schematic diagram of the optical parts of the laser scanner system

1—He-Ne laser; 2—acoustic-optic shutter; 3—aperture; 4—pin-hole spatial filter; 5—object aperture; 6—x-y galvanometer-driven mirror; 7—holographic plate; 8—laser expander and collimation

重的失真。如果我们分析一下不同频带宽度形成的光栅结构,就可以了解它们对滤波效果

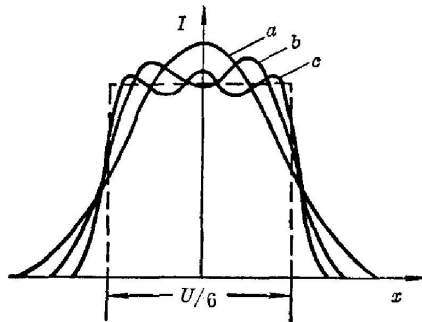


图3 复盖不同频带宽度时,采样孔的光强分布  
(a) 复盖零级谱; (b) 复盖 $\pm 1$ 级边带;  
(c) 复盖 $\pm 2$ 级边带

Fig. 3 Intensity distribution in each pixel with different coverages of the spatial frequency bandwidths by mirrors

(a) coverage with "0" order; (b) coverage up to  $\pm 1$ st order sidelobes; (c) coverage up to  $\pm 2$ nd order sidelobes

的影响。理想的矩孔函数周期性的重复形成类似于 Ronchi 光栅结构。根据傅里叶分析,它除了 $\pm 1$ 级衍射波外,还存在高级次衍射波,其衍射效率很低。若反射镜只复盖零级谱,物孔的象是一个类似于正弦波“波峰”(图3(b)),因而由这种象周期性重复所形成的光栅,近似于正弦光栅,它基本上只有 $\pm 1$ 级衍射波。若这两种光栅分别调制了滤波函数信息,则由 Burekhardt 编码原理,在 $\alpha = \sin^{-1}\lambda/U$ 衍射方向上,两者的滤波效果应基本相同。

但对于一步成象的扫描转镜,由于要把物孔一次缩小到所需要的尺寸,必然采用较长焦距的透镜 $L_1$ ,或采用较小的物孔,这两者都将引起物孔的空间频谱扩展,若欲仍复盖整个零级谱,必然增加反射镜的尺寸,因而降低转镜的响应时间。

#### 四、扫描控制系统

我们研制的扫描控制系统 MC-81 的原理方框图见图4,它由中央控制单元和一些外围接口电路所组成。控制系统的工作流程图见图5。它接收计算机送来的信号并把它变成快门开启信号以控制声光开关的开启与关闭,同时由程序控制器按次序输出 $x$ 向与 $y$ 向二进制地址信息,控制扫描转镜的偏转,以实现各采样单元的写入。系统用快启动的光电机作为输入数据手段,由于采用八单位并行输入,数据传送率可达2000 bit/sec。为了进一步加快滤波器写入速度,系统采用并行工作制,在输入下一数据的同时,完成曝光与变换地址。这样,在我们的系统中,绘制一片 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 采样孔数为 $512 \times 256$ 的计算全息滤波器仅需17分钟。采用光电机作为我们的激光扫描系统与计算机的接口,可使滤波器的计算在任一具有穿孔输出的计算机上进行,增加了灵活性。

由于曝光数据输入采用7 bit 表示,因此每一采样孔可以有128个灰阶。在控制系统中,时间常数可以调节,使不同灰阶的曝光量都落在 $H-D$ 曲线的线性区域,从而避免了光路衰减量的微调。

为了适应不同滤波器制作的要求,控制系统还可以很方便地改变所制作的滤波器尺寸和采样孔的多少。

#### 五、实验结果

##### 1. 扫描系统的综合线性度误差

采用 Burekhardt 编码方式时,要求采样孔组成的光栅周期相等,这样才能使每一像素

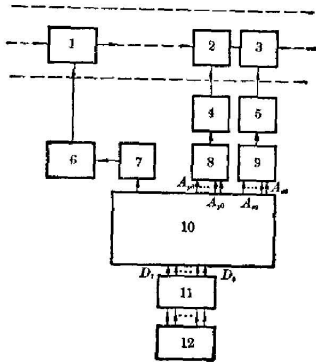


图4 MC-81 扫描曝光控制单元方框图

1—声光开关; 2—y向转镜; 3—x向转镜; 4—y向转镜驱动器; 5—x向转镜驱动器; 6—声光开关激励源; 7—声光开关输出接口; 8—y向D/A变换; 9—x向D/A变换; 10—MC-81中央控制器; 11—光电输入接口; 12—光电机

Fig. 4 Logic diagram of MC-81 scanning-exposure-controller optical system

1—acousto-optic shutter; 2—y-direction scanning mirror; 3—x-direction scanning mirror; 4—driver for y-mirror; 5—driver for x-mirror; 6—driver for acousto-optic shutter; 7—interface of shutter with MC-81; 8—D/A converter for y-driver; 9—D/A converter for x-driver; 10—MC-81 central control board; 11—interface of optic-electronic reader with central controller; 12—optic-electronic reader

的三个采样孔的一级衍射光波之间有  $2\pi/3$  位相差。若采样孔之间的距离有误差, 则直接影响采样孔衍射光波之间的位相差, 从而使原来期求的滤波函数的波面发生畸变。通常若波面畸变小于  $\lambda/8$  时, 则可以认为其对滤波效果无明显的影响。

采样孔之间的距离误差称线性度误差, 它是扫描控制系统及光学系统中各种非线性因素的综合结果, 故亦称综合线性度误差。我们采用的扫描转镜的线性度误差小于 0.1%。4025 型数模转换器为 12 bit, 其线性度误差优于  $(1/2)\text{LSB}$ , 由于地址变换只需要 10 bit, 故最低线性度误差优于  $(1/8)\text{LSB}$ 。光学系统中各采样孔对主轴距离与扫描角度的正切(而不是角度本身)成正比, 所以由它以及系统畸变引进的线性度误差更不能忽视。

我们对绘制出的一块没有载波信息的光栅 ( $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ) 进行了测试, 可得到每一采样孔的线性度误差(实测值与最佳拟合直线值之差)。在不同采样范围内, 经计算, 其绝对线性度

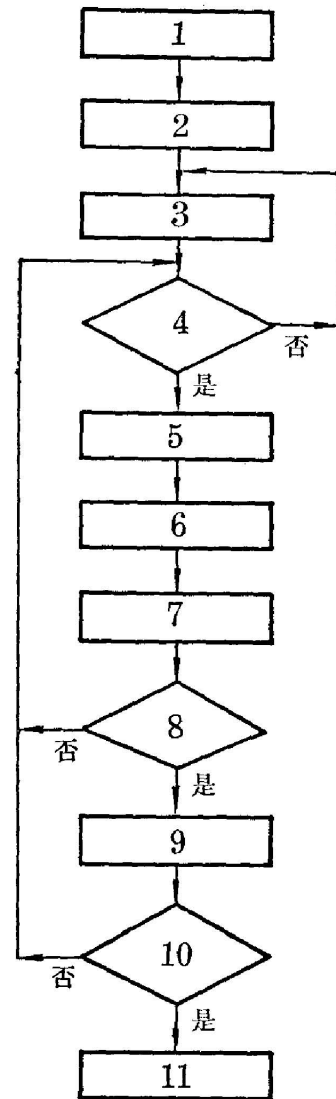


图5 MC-81 控制单元工作流程图

1—复位  $x=y=0$ ; 2—启动; 3—光电机输入; 4—数据  $N$  已输入吗?; 5—计算  $t=N \cdot \tau_0$ ; 6—输出宽度为  $t$  的开门脉冲; 7— $x=x+1$ ; 8—一行写完否?; 9— $y=y+1$ ; 10—一页写完否?; 11—结束

Fig. 5 Flow-chart of central controller MC-81

1—reset  $x=y=0$ ; 2—start; 3—input from optic-electronic reader; 4—have the data feeded?; 5—calculate  $t=N \cdot \tau_0$ ; 6—output an exposure pulse with width= $t$ ; 7— $x=x+1$ ; 8—have one complete line written?; 9— $y=y+1$ ; 10—have one complete page written?; 11—end



表 1

采 样 孔 序 数	64~192	32~224	16~240	1~255
绝对线性度均方根误差	4.1 $\mu$	4.5 $\mu$	4.5 $\mu$	5.0 $\mu$

均方根误差有如上表 1:

其百分比误差为 0.1%。上表说明在 64-192 采样孔范围内, (即滤波器中心部分), 综合相位误差为  $\lambda/15$ , 而在 1-255 采样孔范围内综合相位误差为  $\lambda/12$ 。经分析, 扫描角度的正切所引起的线性度误差起主要作用。

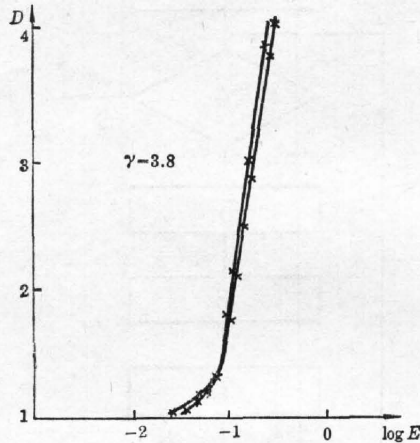


图 6 国产天津全息 I 型底片的  $H-D$  曲线  
D-19 (稀释 50%); 显影时间: 4 分钟;  
显影温度: 20°C;  $\gamma=3.8$

Fig. 6  $H-D$  curve of the holographic plate  
type I made in Tianjin

developer-19 (dilute 50%); developing time: 4  
min.; developing temperature: 20°C;  $\gamma=3.8$

## 2. 绘制滤波器

先用 Burekhardt 编码方式计算某一滤波函数中每一像素的三个采样孔的振幅透射系数(正实数值)  $T_{mn}$ , 它与采样孔的曝光时间  $t_{mn}$  有如下关系:  $T_{mn} = K(I_0 t_{mn})^{-\gamma/2}$ 。其中,  $I_0$  为曝光光强。所以如果使感光底片工作在  $H-D$  曲线的线性区域并控制底片的  $\gamma$  值, 则可按上式确定每一采样孔的曝光时间。

底片的  $H-D$  曲线及  $\gamma$  值用我们自己研制的 20 级密度等差阶梯板及简易密度计来测量。底片  $\gamma$  值的控制精度可达到 1%。图 6 为国产天津全息 I 型底片的  $H-D$  曲线及相应的  $\gamma$  值。图 7 为用扫描系统绘制的一维微分滤波器放大照片。图 8 为待处理的图像(单缝)用一块 RL-128G 型一维

探测器阵列测得的光强分布, 探测器取样间隔为 25 $\mu$ 。图 9 为微分图像用探测器阵列测得的光强分布, 可以看出在缝的边缘有两个宽度约为 50 $\mu$  的微分尖脉冲, 尖脉冲之间为噪声讯号。用通常二元计算全息图绘制的微分滤波器对上述同样单缝图像进行微分处理, 其结果由图 10 给出, 可以看出在缝的边缘脉冲宽度约为 150 $\mu$ , 微分效果要比前者差一些。这是由于前者的取样数及振幅透射系数的量子化数要比后者大得多。虽然如此, 目前用我们扫描系统所绘制的滤波器处理图像, 其噪声较大, 我们初步认为这是由于绘制时激光的斑纹噪

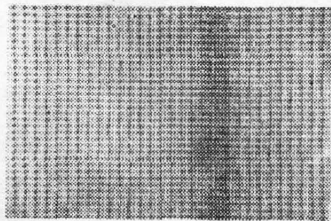


图 7 一组微分滤波器放大照片

Fig. 7 Enlarged portion of a one-dimensional  
spatial filter

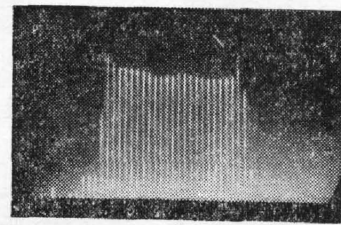


图 8 用 RL-128G 型一维探测器阵列测得的  
单缝光强分布

Fig. 8 Intensity distribution display of a slit  
detected by a linear array detector of RL-128G

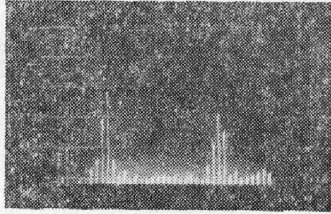


图9 经激光扫描绘制的滤波器处理后的单缝微分图像的光强分布

Fig. 9 Intensity distribution display of the processed slit by differentiation with the spatial filter fabricated by the laser scanner

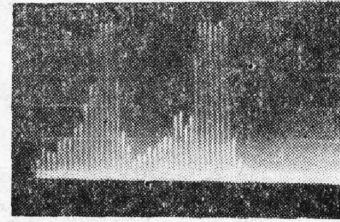


图10 经通常二元计算全息图绘制的滤波器处理后的单缝微分图像的光强分布

Fig. 10 Intensity distribution display of the processed slit by differentiation with the spatial filter fabricated by conventional optical method

声及光学系统多次剩余反射引起的背景噪声所致,这还需要我们进一步分析探讨,加以改进。

上海激光技术应用研究所为扫描系统提供了优质声光开关及电流计转镜。张敏毅、凌士金同志参加了这项工作,特此表示深切的感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] A. W. Lohmann, B. R. Brown; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 6 (Jun), 967.
- [2] C. B. Burckhardt; *Appl. Opt.*, 1970, **9**, No. 8 (Aug), 1949.
- [3] S. H. Lee, J. R. Leger; *Opt. Engineering*, 1979, **18**, No. 5 (May), 518.
- [4] M. J. Buzawa, R. E. Hopkins; *«Laser Recording and Information Handling Technology»*, 21-22 August, 1974, **53**, 9.

## Laser scanner for computer-generated holograms

YIN XUANTONG XIA SHAOFENG JIA YUSHUN AND ZHANG ZHIMING

*(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)*

(Received 9 September 1981)

### Abstract

Computer-generated holograms for optical spatial filtering drawn by a laser scanner have several advantages, such as they could be obtained with the proper size directly without further reduction photographically, and the pixels of the hologram with grey scales. We design and construct such a system but with some modifications to meet the requirements of using simple and inexpensive optics as well as obtainable electronics. A field lens is adapted to keep the scanning beams almost fixed during their entering into the camera lens and hence it is unable to use a camera lens of f-number down to less than  $f/1.2$ . The reduction ratio of the dimensions of the input aperture to the final pixel is chosen to be 1:32, the galvanometer-driven scanning mirror could cover the first sidelobes of the diffraction pattern of the input aperture. The system is driven by a compact CMOS electronics which is assembled in our laboratory, and used to control the scanning mirror and the acoustooptic shutter synchronously. The present setup has the following capabilities: (1) grey scale: 127; (2) spatial resolution:  $10\mu \times 20\mu$ ; (3) size of the hologram in  $\text{mm}^2$ :  $10.2 \times 10.2$ ; (4) space-bandwidth product:  $1024 \times 512$ ; (5) time needed in minutes: 17. We have also fabricated several spatial filters for optical processing by using this system and the performances of such filters are presented.