

# 文字图像编码转换所用的计算全息滤波器

谢 敬 辉

(北京工业学院工程光学系)

程慧玲 邬敏贤 金国藩

(清华大学精密仪器系光学仪器教研组)

## 提 要

本文研究了用计算全息图实现复空间滤波器的问题,研制了逆滤波器,维纳滤波器和指数型维纳滤波器。将这些滤波器应用于文字图像的编码、译码系统,并对实验结果进行了比较。

## 一、引 言

六十年代初,鉴于用纯光学方法制造复数空间滤波器的困难, Lohmann 和 Brown 等人首先研究用计算全息图直接综合复空间滤波器。

图像消模糊,是光信息处理中最吸引人的课题之一。传统的图像消模糊,常采用分层结构的逆滤波器,它成功的关键在于记录相位滤波器时胶片的  $\gamma$  值控制是否正确,这是纯光学方法的困难之所在。用计算全息图制造复数空间滤波器可以依据滤波器点扩散函数的解析表示式来计算画图,这就避免了上述光学方法的困难,而且可以合成复杂的滤波器函数。它不仅方式灵活,编码的模糊度高,而且可以得到很好的译码效果。本文研究了三种用于文字图像编码转换的计算全息滤波器,即逆滤波器,维纳滤波器和指数型维纳滤波器,并从实验上比较这些计算全息滤波器用于文字图像编码转换的能力。

## 二、基本公式和幅值修正及系统噪声

设计复空间滤波器时采用迂回相位型的傅里叶变换全息图。计算傅里叶变换全息图的基本公式是:

$$\left. \begin{aligned} H(I, J) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} h(n, m) W_1^{In} \cdot W_2^{Jm}, \\ W_1 &= \exp(-i2\pi/N), \quad W_2 = \exp(i2\pi/N), \\ I &= 0, 1, 2, \dots, N-1; \quad J = 0, 1, 2, \dots, M-1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $h(n, m)$  是滤波器点扩散函数的抽样形式,  $H(I, J)$  是离散的滤波系统传递函数。  $N, M, I, J$  分别表示空域和频域的抽样数。

在应用基本公式(1)时,已经假定物空间的每一个抽样单元是一个几何点,所以离散化的系统点扩散函数可以表示为:

收稿日期: 1982年4月12日,收到修改稿日期: 1982年9月2日

$$h(n, m) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} h(x, y) \delta(x-n dx) \delta(y-m dy) \quad (2)$$

但在实际上,物空间每一个抽样单元都是尺寸为  $dx \cdot dy$  的矩形,因此系统点扩散函数的抽样应当更准确地表示为:

$$h(n, m) \otimes [\text{rect}(x/dx) \cdot \text{rect}(y/dy)], \quad (3)$$

$\otimes$  为卷积符号。计算(3)式的离散傅里叶变换并取出其中一个周期,于是,系统传递函数可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} H(I, J) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} h(n, m) W_1^{In} \cdot W_2^{Jm} \cdot R(I, J), \\ I &= 0, 1, 2, \dots, (N-1), \quad J = 0, 1, 2, \dots, (M-1), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$R(I, J) = \text{sin } O[(I-N/2)/N] \cdot \text{sin } O[(J-M/2)/M], \quad (5)$$

(4) 式中  $R(I, J)$  是一修正因子,由(5)式可以看出,  $R(I, J)$  是一实函数,它只对系统传递函数的幅值起作用。由于  $R_{\max} = R(N/2, M/2) = 1$ ,  $R_{\min} = R(0, 0) = 0.4053$ , 所以修正因子在频率平面上最边缘一个单元引起的幅值误差可达 60%。如果计算全息图仅用于图形显示,幅值误差不会起很大作用。但在空间滤波中,系统传递函数的幅值分布与滤波操作密切相关,这样大的误差显然是不能容忍的。我们在工作中对滤波器函数的幅值进行了必要的修正。

### 三、空间逆滤波

用随机点阵列与文字图像作非相干光卷积,使文件模糊化,然后通过空间滤波消模糊,恢复原始文字图像,这在实际使用过程中就可以构成一个非相干光编码,相干光译码的文件保密系统。

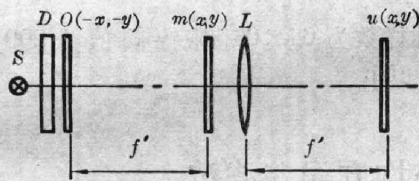


图 1 平行光卷积装置

Fig. 1 Parallel light convolution system

我们采用图 1 的平行光卷积光路来实现文件的编码。图中由光源  $S$  和散射板  $D$  提供了对输入透明片的非相干光照明,  $m(x, y)$  是一随机点阵列(如图 2(b)所示)。我们采用图 2 的单个字符“H”与四点随机阵列的卷积作为空间滤波系统的输入。

在图 1 中通过线性记录得到的模糊透明片的振幅透过率将正比于:

$$u(x, y) = m(x, y) \otimes O(x, y), \quad (6)$$

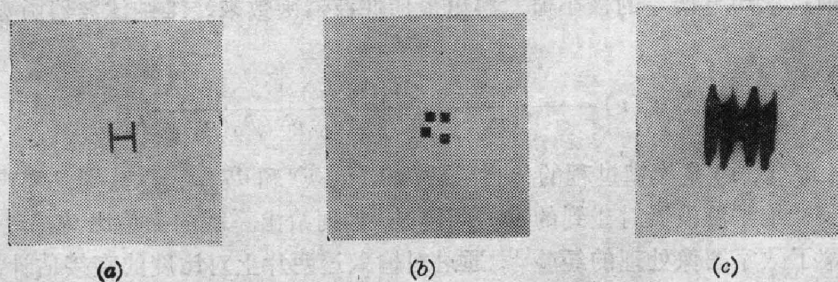


图 2 字符“H”与四点随机阵列的卷积

Fig. 2 Convolution of random array of “H” and four points

它的傅里叶变换:

$$U(\mu, \nu) = M(\mu, \nu) \cdot O(\mu, \nu). \quad (7)$$

由公式(7)看出, 逆滤波器函数应当是:

$$H(\mu, \nu) = 1/M(\mu, \nu). \quad (8)$$

用计算全息图实现逆滤波器时需要处理滤波器函数中的无穷大极值点。对此, 常采用把极值取作某一合适的常数, 即限幅处理, 然而这样必然会损失极点处的信息。同时还要考虑到系统噪声的存在。当采用加性噪声模型时, 卷积系统的输出应当更恰当地表示为:

$$u(x, y) = m(x, y) \otimes O(x, y) + n(x, y), \quad (9)$$

它的傅里叶变换:

$$U(\mu, \nu) = M(\mu, \nu) \cdot O(\mu, \nu) + N(\mu, \nu), \quad (10)$$

经滤波之后, 透过的复振幅是:

$$U(\mu, \nu) \cdot H(\mu, \nu) = O(\mu, \nu) + N(\mu, \nu)/M(\mu, \nu). \quad (11)$$

在光信息处理中, 涉及的噪声大多具有“白”噪声的性质, 即  $N(\mu, \nu)$  几乎不随空间频率而变化, 但是随机点阵列却具有低频的特性, 即  $M(\mu, \nu)$  随空间频率的增大而迅速衰减, 因此, 在  $M(\mu, \nu)$  的零点附近和低频部分, 公式(11)的第二项变得很大, 它在输出面上以噪声形式出现, 以至会完全淹没有用的第一项。一般说来, 逆滤波器在处理滤波器函数的极点和系统噪声方面的能力是有限的, 它只能恢复有限的低频分量。

图3是对图2中的随机点阵列制造的逆滤波器。抽样数为  $64 \times 64$ , 限幅阈值为 200。计算表明, 此滤波器函数的极点占全部抽样单元的 15% 以上。

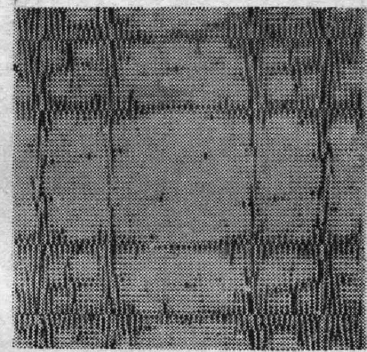


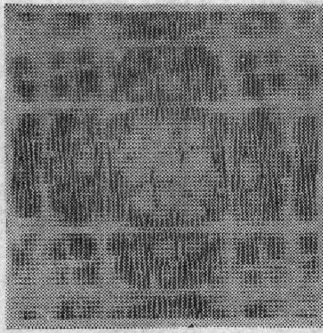
图3 逆滤波器  
Fig. 3 Inverse filter

#### 四、维纳滤波器的制造及最小均方误差滤波

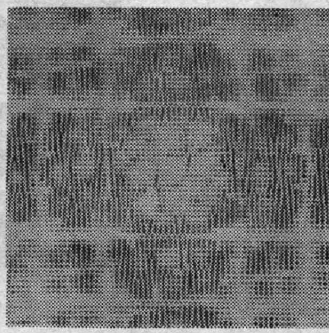
维纳滤波是信号检测与估值中的课题之一, 它只解决最小均方误差准则下的线性滤波问题。它的基本出发点是: 把滤波器的输入(包括信号和噪声)作为平稳零均值的高斯过程处理, 而把滤波作为线性过程来处理。也就是说, 把信号的估计值取作各次观测值的线性组合。然后通过求均方误差的极小值, 解出最佳滤波器函数来。维纳滤波器函数的解析式为<sup>[2]</sup>

$$H(\mu, \nu) = \frac{M^*(\mu, \nu)}{|M(\mu, \nu)|^2 + \Phi_n(\mu, \nu)/\Phi_o(\mu, \nu)}, \quad (12)$$

公式(12)中,  $M(\mu, \nu)$  是模糊过程的传递函数,  $\Phi_n(\mu, \nu)$  和  $\Phi_o(\mu, \nu)$  分别是噪声和信号的功率谱。在制造维纳滤波器时碰到的唯一问题是, 如何给出系统的噪信比  $\Phi_n(\mu, \nu)/\Phi_o(\mu, \nu)$ 。我们借鉴了数字图像处理的经验<sup>[3]</sup>, 通过对输入透明片上对比度的直接估计, 把噪信比取作某一个较小的常数  $\epsilon$ , 图4(a)和(b)分别是按  $\epsilon=1/500$  和  $\epsilon=1/1000$  对上述随机点阵列制造的维纳滤波器。消模糊的结果表明, 两种维纳滤波器的差别不明显。这说明对常数



(a)



(b)

图4 维纳滤波器  
Fig. 4 Wiener filter

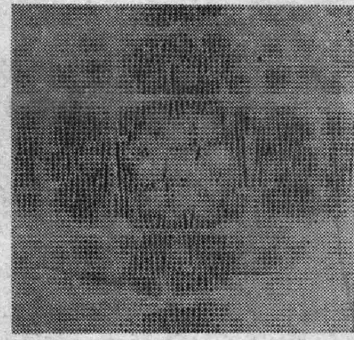


图5 指数型维纳滤波器  
Fig. 5 Wiener filter of  
exponential type

$\varepsilon$  的选取并不十分苛刻。

1969年, Horner<sup>[4]</sup>在制造光学空间滤波器的工作中,分析了维纳滤波器的噪信比取值问题认为,把噪信比取作常数也有其不尽合理之处。因为尽管在分析中作了“白”噪声的假设,可以在所考虑的频率范围内把  $\Phi_n(\mu, \nu)$  看作常数,但  $\Phi_0(\mu, \nu)$  却是随空间频率增大而迅速衰减的。如果把衰减过程用指数函数来近似(当然也可以考虑按高斯函数或别的规律来近似),则噪信比可以表示为:

$$\Phi_n(\mu, \nu) / \Phi_0(\mu, \nu) = \varepsilon \exp[(2\mu/U) + (2\nu/V)], \quad (13)$$

式中常数  $\varepsilon$  的选取原则仍如前述,  $U, V$  是计算全息图的频带宽度。于是改进的指数型维纳滤波器函数是:

$$H(\mu, \nu) = \frac{M^*(\mu, \nu)}{|M(\mu, \nu)|^2 + \varepsilon \exp[(2X\mu/N) + (2Y\nu/M)]},$$

式中  $X, Y$  是模糊点扩散函数的空间宽度,且有  $U = N/X, V = M/Y$ 。

图5是上述随机点阵列的指数型维纳滤波器。可以看出,这一改进的影响主要在高频区域,对零点位置和低频段分布几乎不产生什么影响。

## 五、实验技术和结果

制造二元复空间滤波器时,要合理安排输入数据区,使一级再现像不和另级像重迭。设输入面空间宽度为  $X$ ,作  $N$  次抽样。安排模糊函数的数据区占  $X/K_1$ ,输入字符占  $X/K_2$ ,通常将  $K_1$  和  $K_2$  取在 3~5 之间。

一个图像的轮廓形状,主要由它的低频分量所决定。因此在设计空间滤波器时,要把恢复物体的低频成分放在首要位置来考虑。设模糊函数中的最精细结构占据  $n$  个单元,即最细的线宽为  $nX/N$ 。 $n$  取得越小,表示模糊函数的结构越精细,它的频谱越益扩展,对它的低频分量抽样越充分。我们在制造复空间滤波器时,  $N=64$ ,每个随机点占  $5 \times 5$  个单元,这样,在频谱的主瓣范围内,大约可以采到 25 个抽样点。所以画出的计算全息图很好地显现出了频谱的分布花样。

空间滤波实验是在图6所示的光信息处理机上完成的。在操作中要调整空间滤波器的

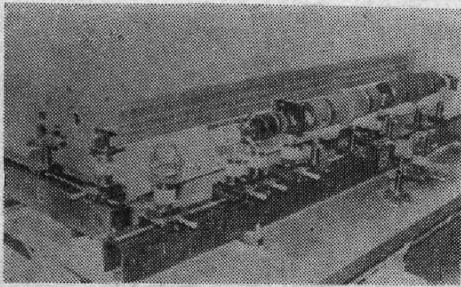


图 6 光信息处理机

Fig. 6 Optical information processor

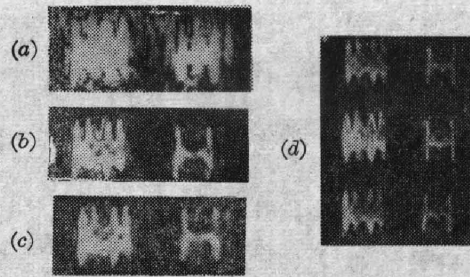


图 7 各种滤波的结果

Fig. 7 The results for filtering

横向,纵向和角向位置,保证输入透明片的光学频谱与二元滤波器的离散频谱精确重合。为此,我们采用比较和消除计算全息图上反对称单元亮度差的办法来对准,能很容易将对准误差控制在  $1/4$  个抽样单元之内。

图 7 是用几种计算全息滤波器消模糊的结果。图 7(a) 是逆滤波的结果,左边是零级像,右边是 +1 级像。

图 7(b) 和 (c) 是最小均方误差滤波的结果。其中  $\epsilon=1/500$  和  $\epsilon=1/1000$  的维纳滤波器效果差别不大。可以看出,最小均方误差滤波基本上消除了卷积造成的模糊,在 +1 级再现了原始字符“H”,滤波效果大大优于逆滤波器。图 7(d) 是指数型维纳滤波器的滤波结果。和图 7(b)、(c) 相比,指数型维纳滤波器处理效果更好,这主要表现在再现的 +1 级像有较小的背景噪声。

## 六、结 论

本文阐述了三种二元复空间滤波器的原理和设计方法,滤波器的制造和相应的空间滤波实验。以计算全息图作为手段,实现了文字图像的编码、译码。论文提供的实验结果表明,最小均方误差滤波,对于消除由随机点阵列卷积造成的模糊,具有良好的效果。

## 参 考 文 献

- [1] H. L. Von Trees; «*Detection, Estimation and Modulation Theory*», (John Wiley and Sons Inc., 1968), 584.
- [2] C. W. Helstrom; *J. O. S. A.*, 1967, **57**, No. 3 (Mar), 297.
- [3] Rafael C. Gonzalez, Paul Wintz; «*Digital Image Processing*», (Addison-Wesley Publishing Company, 1977), 207.
- [4] J. L. Horner; *J. O. S. A.*, 1969, **59**, No. 5 (May), 553.

## Computer-generated filters for coding and decoding dilute images

XIE CHINGHUI

(Beijing Institute of Technology)

CHENG HUILING WU MINSHIAN AND CHIN KUOFAN

(Qing Hua University, Beijing)

(Received 12 April 1982)

### Abstract

Deblurring images is a very attractive subject in optical information processing. The content of this paper is making an arbitrary blurring of alphabets "H" by a convolution with a random array in the space domain, and then use a filter in a frequency plane to eliminate the blur by division operation.

The complex space filters produced by the computer-generated hologram method can construct many new and fascinating coding and decoding systems for dilute objects.

Since the application of the technique of computer-generated hologram these systems become not only more flexible and ambiguous in coding but also more effective in the process of decoding. In this paper several computer-generated filters inverse filter, Wiener filter and Wiener filter of exponential type have been described. The capability of all these filters for cryptology has been tested and compared experimentally.

(上接第 241 页)

**网格式高速摄影相机** 已研制成节距 0.4 mm、 $8 \times 10^4$  像素的柱面正交有机玻璃网格板。国际上最早由龚祖同教授提出的光纤网格板, 已制成柱面网格板, 是网格器件研制方面的一个重要进展。利用网格器件与扫描变像管相机相结合, 有可能使分幅摄影的时间分辨率达到微微秒量级, 这是值得注意的新动向。

**高速电视相机** 已研制成 200 f/sec 和 400 f/sec 单次工作系统。

**照明光源** 中、低速摄影机广泛使用氙灯, 高速摄影机应用高强度脉冲氙灯, 爆表试验中应用高效炸药照明光源, 可见光谱区的亮度已接近  $10^6$  lm/cm<sup>2</sup>·sr, 氙气爆炸光源约为  $10^7$  lm/cm<sup>2</sup>·sr。

**记灵底片** 已于 1982 年研制成功 1087 型流光片, 感光度 33 Din, 同时对  $10^{-9}$  sec 情况下底片倒易律失效问题的研究也取得良好的结果。

**数据判读设备** 利用我国自制的通用判读仪, 在座标测量精度和某些功能方面已经达到国外同类设备的水平。

**高速 X 射线摄影** 早在六十年代我国就开始了 X 射线高速摄影技术的应用研究, 现在时间分辨率毫微秒量级的 X 射线高速摄影技术已臻成熟, 并已由单台单次摄影发展到 3~4 台联用, 从高能 6 MV 到各种低能脉冲 X 光机, 均已研制成功, 并将逐步转向批量生产。

**高速摄影的应用技术** 从本届会议的报告看, 这方面的论文占全部论文的 1/3 强, 标志着我国高速摄影技术正由实验室走向各应用领域。

会议期间召开了一次高速摄影与光子学专业委员会会议, 初步议定第四届全国高速摄影与光子学学术会议将在 1984 年或 1985 年举行, 地址建议在大连市或天津市。

(乙 民 谭显祥)