

# 用数字 DPCM 的光学计算方法 实现图象信息量压缩

林 宁 吴长发 叶嘉雄

(华中工学院光学工程系)

**摘要**——应用数字 DPCM 信息压缩的理论,对信息量压缩的光学模拟方法进行计算和讨论,设计了一个完全由光学元件构成的图象信息压缩系统,并展示了验证此系统可行性的初步实验结果。

## 一、引 言

图象信息压缩是图象处理的重要应用之一。多年来,人们利用电子计算机在图象信息压缩方面进行了广泛的究研,取得了一定的成果。在一定保真度的条件下,对传输和存贮的二维图象进行信息压缩处理,消除图象信息的多余部分,以降低对传输带宽及存贮量的要求。

本文讨论了一种纯光学处理的图象信息压缩方法。用数字微分脉码调制(DPCM)信息压缩理论,对用光学方法在 DPCM 系统各压缩环节中的模拟进行了计算和讨论,并设计了相应的光学模拟元件。初步试验结果证明:可用完全由光学元件构成的非相干光学系统实现图象信息压缩。本文最后对图象压缩和系统可行性进行了计算、分析和讨论。

## 二、预测压缩和非因果模拟

数字 DPCM 是一种预测压缩方法,其图象压缩系统如图 1 所示。系统左边为压缩回路,右边为重建恢复回路。

输入图象用一维数据  $f_n$  表示。量化器可用一维线性噪声源来模拟,即量化噪声的抽样值是  $n_n$ ,线性地加到量化器的输入端。通过  $z$  变换,压缩系统的输出为<sup>[2]</sup>

$$G(z) = [1 - H(z)][F(z) - N(z)]; \quad (1)$$

式中,  $H(z)$  是预测权因子  $h_j$  的  $z$  变换。

恢复系统的传输函数容易看出是  $G(z)/[1 - H(z)]$ ,因此,恢复端输出为

$$\hat{F}(z) = F(z) + N(z); \quad (2)$$

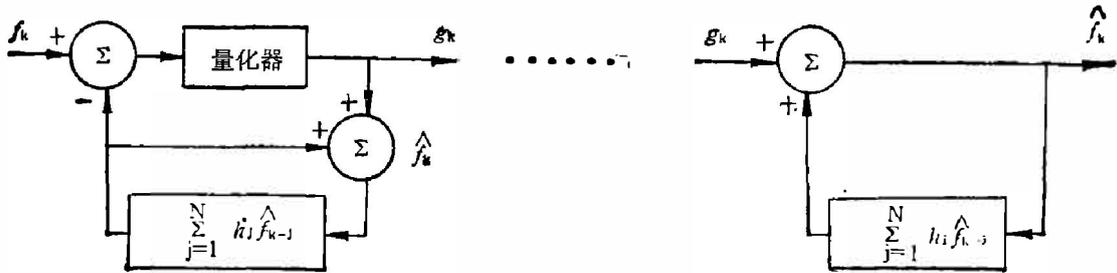


图1 数字 DPCM 图象压缩系统

Fig. 1 Digital DPCM image compression system.

即恢复数据为初始数据加上量化噪声。

预测函数  $H(z)$  表示一个低通的传递函数, 因此, 式(1)中  $[1-H(z)]$  为高通的, 即由  $f_k$  精确预测  $\hat{f}_k$ , 经过差分, 输出值  $g_k$  仅由一些不能被预测的要点——图象的高频分量组成, 由此大大压缩了信息量。由于  $[1-H(z)]$  是高通的, 则其倒数  $1/[1-H(z)]$  在低频部分将具有相当大的幅度, 在高频部分衰减, 也即系统的传输函数具有低通的频率特性。

图1所示预测器具有因果性, 即抽样数据  $f_k$  是图象像素的时间序列。因果性是数字图象处理的一般特点, 但光学处理却是非因果的。模拟图1系统, 对于一个非因果的二维传递函数  $h(x, y)$ , 式(1)的二维傅里叶变换结果为<sup>[3]</sup>

$$G(\omega_x, \omega_y) = [1-H(\omega_x, \omega_y)][F(\omega_x, \omega_y) + N(\omega_x, \omega_y)]. \quad (3)$$

图2为数字 DPCM 信息压缩的非因果模拟系统。图中的量化器是一个非相干光学系统, 它以全并行的由图象到图象的形式完成<sup>[4]</sup>, 反馈和振荡可用分束器和反射镜实现<sup>[5]</sup>。图2中, 压缩回路的输出可以表示为

$$g(x, y) = Q \left[ f(x, y) - \iint_{\infty} P(x-x_1, y-y_1) g(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \right]; \quad (4)$$

式(4)中,

$$P(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{\infty} \exp[-j2\pi(\omega_x x + \omega_y y)] / [1-H(\omega_x, \omega_y)] d\omega_x d\omega_y; \quad (5)$$

函数  $Q$  是一个量化函数。式(5)给定了  $P$  的定义, 因此, 式(4)非线性积分的结果在空域中可以决定非线性压缩的输出。

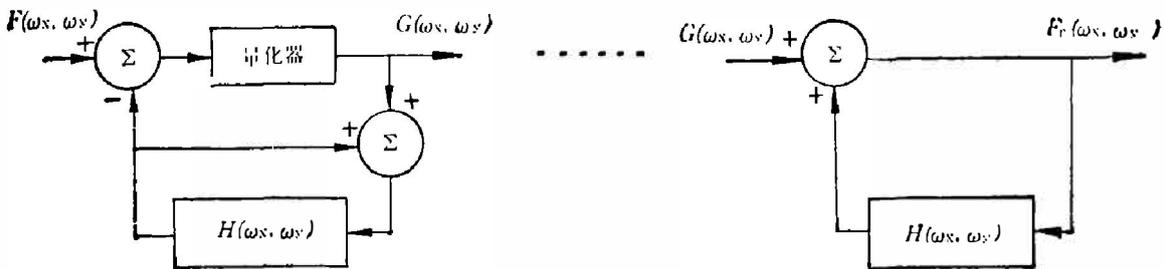


图2 数字 DPCM 的非因果模拟

Fig. 2 Non-causal analog system of Digital DPCM.

这种非因果的相干光学模拟系统在理论上是可行的, 但在实际应用时则必须尽量减小相干噪声和量化误差, 因为这些误差经环路多次循环直至平衡所产生的累积误差将是很大的。因此必须采取十分精密的措施保证组件安全可靠、保证系统不受随机干扰, 并能切实控

制照明光的相干波长,这样才能实现反馈。

### 三、非相干光学模拟

对 DPCM 的模拟可归结为对低频信息的编码以及对高低频分量间的差分。

低频编码有许多方法,这里选用容易实现的插值方法<sup>[6]</sup>。输入图象用  $f(x, y)$  表示,它被  $x=j\Delta x, y=k\Delta y$  抽样,  $j, k=1, 2, 3, \dots, N$ 。用二次抽样光栅作第二次抽样,即保留样值  $x=jm\Delta x, y=km\Delta y, j, k=1, 2, 3, \dots, N/m$ 。如果给出合适的点扩散函数  $h(x, y)$ ,则插值图象的样值为<sup>[7]</sup>。

$$f_i(j\Delta x, n\Delta y) = \sum_r \sum_s f'(r\Delta x, s\Delta y) h[(j-r)\Delta x, (k-s)\Delta y]; \quad (6)$$

式中,  $f'$  是在二次抽样阵列中插值到失去象素的地方所得到的  $N \times N$  阵列。以上讨论用的是抽样算法和离散卷积,对于连续的光学图象,上述讨论仍然有效,只是总象素数  $N$  可以利用非相干光学截止频率计算,式(6)也应变成连续卷积形式。

$f_i$  的特性取决于光学插值函数  $h$ , 比较简单且光学上容易模拟的插值函数可以选用线性插值函数,其频率响应为<sup>[6]</sup>

$$H(e^{j\omega T}) = \frac{1}{L} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{\omega LT}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega T}{2}\right)} \right\}^2; \quad (7)$$

式中,  $L$  为任意整数;  $T$  为函数序列周期。显然,传递函数  $H(e^{j\omega T})$  具有低通的频率特性。在光学上可用如图 3 所示的聚焦透镜和可变光栏构成的非相干光学插值器来模拟式(7)的线性插值器函数。图 3 中,  $P_1$  为物面,  $P_2$  为紧贴透镜的可变光栏面,  $P_3$  为象面,  $d_0$  为物距,  $d_1$  为象距。因为象面离焦,所以真正的象面不在高斯光学所确定的位置上,该系统象面具有离焦误差  $\epsilon$ <sup>[8]</sup>。这样,象差函数在出瞳边缘上得到的最大程差为

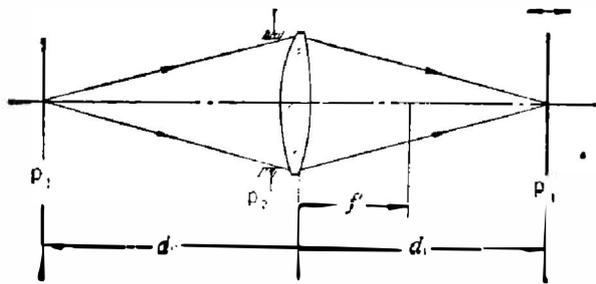


图 3 光学插值器

Fig. 3 Optical Interpolator.

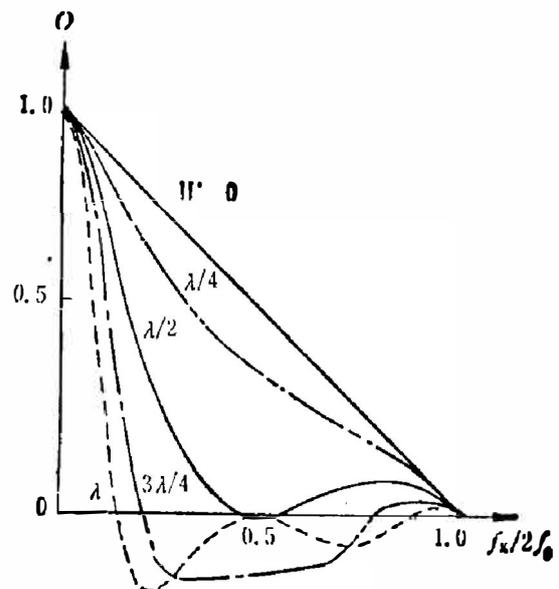


图 4 散焦透镜的 OTF 曲线

Fig. 4 OTF curves of the defocusing lens.

$$W = \frac{\epsilon}{8} D^2; \quad (8)$$

式中,  $D$  表示系统出瞳尺寸。对于不同程差  $W$ , 离焦系统的光学传递函数 OTF 的剖面图如图 4 所示。图中 0 表示系统非相干传递函数,  $f_0$  是系统非相干截止频率。图 4 OTF 曲线表明, 离焦系统也有与式 (7) 所表示的线性预测器相似的低通传递特性。

用输入象  $f(x, y)$  减去插值象  $f_i(x, y)$ , 得到差象为

$$d(x, y) = f(x, y) - f_i(x, y)。 \quad (9)$$

可以用光学方法实现光学图象的差分, 如用 PROM 器件或液晶光阀; 也可用电子学方法实现, 如将光信号转变成电信号, 用电子学差分完成。得到的差分图象即经过信息压缩的图象。

#### 四、实验研究

图 5 为模拟图 1 数字 DPCM 系统的非相干光学压缩实验系统。在这个系统中, 我们用光学插值器代替了图 1 中预测器, 用双通道的非相干光学系统代替图 1 的时间反馈系统, 并用 PROM 器件完成了光学差分。在实验的初始阶段, 采用灰度阶或 0~1 分布的二值图象作为待处理的图象, 因此无需考虑光学量化, 从而简化了实验过程。压缩过程如下:

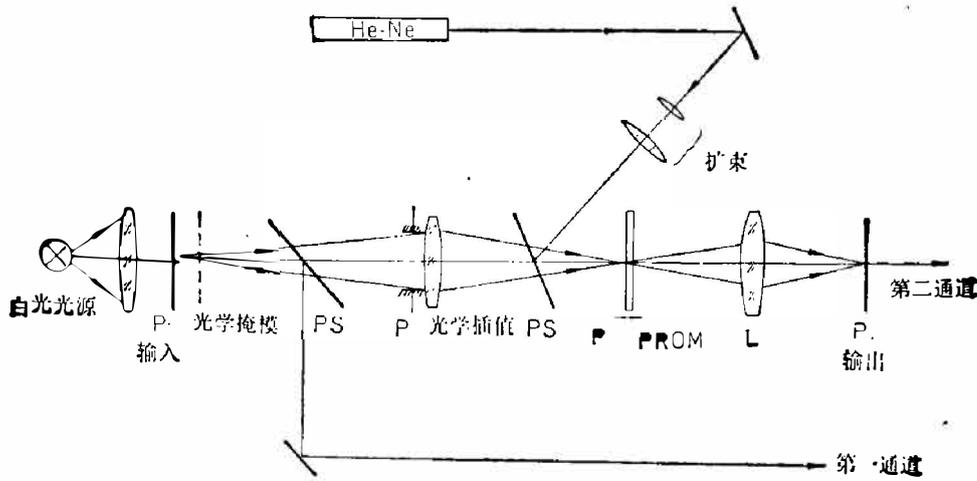


图 5 非相干光学图象压缩实验系统

Fig. 5 The experiment system of the incoherent optical image compression.

1. 初始图象被光学抽样器掩模取样。掩模设计为不透明的屏, 上面周期性地分布着透明小孔。在实验中所用掩模  $R = N/m = 100$ 。样值图象被分光器  $PS_1$  分为两路, 其中一路经第一通道传输。

2. 光学散焦透镜  $f = 210 \text{ mm}$ ,  $D = 37.5 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 570 \text{ mm}$ , 与直径为  $0 \sim 30 \text{ mm}$  的可变光栏一起构成低通的光学插值器。由  $PS_1$  分出的另一路取样图象经此光学插值器, 形成低频象。

3. 在象面  $P_3$ , 由 PROM 器件完成了初始图象和取样图象的差分, 形成信息量极少的高频象。PROM 器件由白光光源透过二色膜片  $PS_2$  的蓝光 ( $440 \text{ nm}$ ) 记录, 由 He-Ne 激光器发出的红光 ( $633 \text{ nm}$ ) 读出, 并成象于  $P_4$  面, 经第二通道传输。

4. 在恢复端,仍可以用图5系统,完成对取样图象的低频插值,并与第二通道传输的高频差象相加形成重建恢复象。

由图5系统压缩处理的初始输入象与重建恢复象如图6和图7所示。



图6 二值输入象  
Fig. 6 Input binary image.



图7 重建恢复象  
Fig. 7 Reconstructed image.

## 五、讨 论

对于输入图象为连续灰度阶分布的函数  $f(x, y)$ , 我们可以用模拟数字的算法粗略估算图象压缩比<sup>[2]</sup>。压缩图象的总象素数为

$$B_t = \frac{N^2}{R^2} N_i + N^2 N_a \quad (10)$$

式中,  $N \times N$  为衍射受限非相干光学系统输入图象  $f(x, y)$  的总象素数;  $R = N/m$  为抽样压缩数;  $N_i$  为样值图象的量化比特数;  $N_a$  为差值图象的量化比特数。每个象素上的比特数为

$$B_t/\text{pixel} = N_i/R^2 + N_a \quad (11)$$

压缩比的定义为初始输入象每个象素的比特数与压缩象每个象素比特数之比。在实验中, 输入象尺寸为  $2.4 \times 2.4 \text{ mm}^2$ ,  $\bar{\lambda} = 550 \text{ nm}$ ; 则由非相干光学系统截止频率可以算出  $N = 6000$ ; 设初始图象的连续灰度阶为 256, 即每个象素用 8 比特量化, 而取  $N_i = 3 \text{ bit/pixel}$ ,  $N_a = 2 \text{ bit/pixel}$ , 则由  $R = 100$  可以算出压缩比为 3.9994; 而且这个值, 对采用光学量化器也有一定参考的意义。

用图5所示的非相干光学系统模拟数字 DPCM 压缩图象信息是完全可行的。图7恢复象的噪声主要来自记录材料 PROM 器件。光学处理方法有比数字处理更快、更实用、更廉价的优点, 并且能以模拟量完成处理。但图5系统仍然只是一个原理性实验系统, 还必须研究出好的光学量化器以及性质优良的记录材料, 才能使本系统发挥实用效力。

## 参 考 文 献

- [1] Abbott R. P., *IEEE Trans. Common Tech COM-19*, 6, Dec. 1971.
- [2] Hunt B. R., *Applied Optics*, **17**(1978), 18: 2944~2951.
- [3] J. W. 顾得门, 傅里叶光学导论, 科学出版社, 1979.
- [4] Deshiell S. and Sawchuk A., *Proc. SPIE* **74**(1976), 93~98.
- [5] Tamura P. N. and Wyant J. C., *SPIE/OSA*, **74** (1976), 57~61.
- [6] Schafer R. W. and Robiner L. R., *Proc. IEEE*, **61**(1973) 6:692~702.
- [7] 李庆扬、王能超、易大义, 数值分析, 华中工学院出版社, 1982.

# IMAGE INFORMATION COMPRESSION REALIZED BY DIGITAL DPCM OPTICAL COMPUTATION METHOD

LIN NING, WU CHANGFA, YE JIAXIONG

*(Optical Engineering Department, Huazhong University of Science and Technology)*

## ABSTRACT

Based on the theory of a digital DPCM, the calculations and discussions on the simulation of the digital DPCM image compression with optical methods are presented, and an incoherent optical system of image information compression is designed. The primary experimental results are shown in this paper to testify the feasibility of this system.