

图像信息压缩的光学处理方法——ODPCM 算法研究

林 宁 吴长发 叶嘉雄

(华中工学院工程光学教研室)

提要: 本文就非相干光学信息处理技术模拟数字微分脉码调制(DPCM)压缩图像信息的 ODPCM 算法进行了理论分析,并详细介绍了对二进制输入像所完成的信息压缩实验。最后,对实验结果和今后的努力方向进行了全面的分析和讨论。

Optical processing methods of image information compression

—A research of ODPCM method

Lin Ning, Wu Changfa, Ye Jiaxiong

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

Abstract: Theoretical analysis is made on ODPCM method for simulating image information compression with digital differential pulse code modulation (DPCM) by incoherent optical information processing technique, and information compression experiment performed with binary input image is described in detail. Finally comprehensive analysis and discussion are made on the experimental results and the future trends.

一、引 言

在一定的保真度条件下以尽量少的信息量传输和存贮二维图像有十分重要的意义,图像信息压缩已成为图像信息处理重要的研究领域。微分脉码调制(DPCM)就是数字图像信息压缩最常用的一种方法^[1]。

但是,数字图像信息压缩处理速度慢,费用高,恢复图像的分辨率十分有限,不易实现实时处理。用光学处理系统压缩图像信息则能实现二维并行运算,速度快,费用低,设备简单,可以实现实时处理。因此,用光学方法

压缩图像信息成为一项有前途的研究课题。1977年, Hunt^[2]首先提出用非相干光学处理模拟数字 DPCM 的 IDPCM 算法,并从理论上探讨了用非相干光学处理系统模拟数字 DPCM 时间反馈系统的方法,用数字计算机进行了初步的模拟性实验,得出一些简单的结果^[3,4]。但对进一步的研究即用具体的光学系统实现信息压缩以及光学插值器、光学掩模的设计等均未发表相应的研究成果。

本文从理论上论证了用非相干光学处理系统(ODPCM)模拟数字 DPCM 压缩图像信息的基本原理和图像信息压缩比的计算、设

收稿日期:1986年12月24日。

计,研制了光学抽样器、光学插值器,并使用国产的实时空间光调制器 PROM 作基线减法运算,提出了非相干光学图像信息压缩实验系统,对二进制图像完成了信息压缩实验,提供了初步的实验结果——发送端的压缩像和接收端的恢复像。

二、理论分析

光学系统是非因果的,因此无法用光学方法实现预测计算。所以,用光学方法模拟数字 DPCM,并非用光学器件一一对应地代替数字元件,也不能用光学元件构成线性预测器,只是模拟数字 DPCM 图像信息压缩的基本原理。相干光学处理是用相干反馈系统来直接模拟数字 DPCM 的时间反馈系统^[5],由于相干噪音和工艺上的原因,这种模拟不易实现。非相干光学处理系统可以克服相干系统的这一困难,直接模拟数字 DPCM 的处理方法,实现图像信息压缩。非相干光学模拟的基本思想是,图像的低频信息可以预测,因而在压缩时消除,并在接收端恢复;表征图像特征的高频信息虽不能预测,但仅占图像能量中的一小部分,可用很少几个比特数编码传输。

图 1 为图像信息压缩的非相干光学模拟—ODPCM 算法的原理简图。ODPCM 系统用双通道非相干光学系统代替数字 DPCM 的时间反馈系统,用低通光学插值器代替线性预测器。系统工作原理如下:输入图像 $f(x, y)$ (此处及以下各处 (x, y) 仅代表图 1 系统的空间参量)用光学掩模取样,得到样值图像

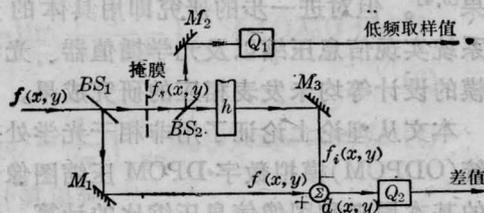


图 1 非相干光学压缩系统原理简图

$f_s(x, y)$ 。样值图像分为两路,一路经光学量化器 Q_1 用低比特数编码传输,另一路经点扩展函数为 $h(x, y)$ 的低通光学插值器后成为低频插值像 $f_i(x, y)$

$$f_i(x, y) = h(x, y) * f_s(x, y) \quad (1)$$

在求和点,算出输入图像 $f(x, y)$ 和低频插值像 $f_i(x, y)$ 的差像 $d(x, y)$

$$d(x, y) = f(x, y) - f_i(x, y) \quad (2)$$

差像经光学量化器 Q_2 后用低比特数编码,由第二通道传输。

在接收端(图 1 中未画出),经第一通道传输的样值图像 $f_s(x, y)$ 用低通插值,得到低频像 $f'_i(x, y)$,将此像与第二通道传输的高频差像 $d(x, y)$ 相加,便重建原始输入像 $f_r(x, y)$

$$f_r(x, y) = f'_i(x, y) + d(x, y) \quad (3)$$

使用 ODPCM 算法,图像信息的压缩体现在如下几个方面:

其一是用光学掩模对原始输入像抽样,连续像 $f(x, y)$ 变成离散的样值像 $f_s(x, y)$ 。抽样结果,光学掩模在空间大量压缩了 $f(x, y)$ 可分辨的像点总数。然而,光学掩模抽样与数字抽样不同,抽样点上有若干个像点,样点间距也远大于 Nyquist 抽样条件。因此,样值图像只是原始图像的一种粗糙表示。值得庆幸的是,掩模抽样所丢失的信息在差像中重新引入,并与高频差像信息一起编码后经第二通道传输,构成接收端恢复像的部分信息。

其二是差值运算。经光学低通插值器后的图像 $f_i(x, y)$ 为输入图像 $f(x, y)$ 的低频部分(低频像),图像的高频部分被光学插值器截去。差值运算结果就得到被插值器所截除的图像高频部分(高频像),这样,在第二通道传输的差像 $d(x, y)$ 仅为表征输入图像 $f(x, y)$ 细节的高频信息,于是实现了传输图像频带的压缩。

其三是图像的光强信息由一、二通道上的光学量化器量化,将图像连续强度分布

量化成有限比特数的信息。

所以表征图像信息的像素、频带、光强分布均实现了压缩。由下式^[3]计算压缩图像的总比特数 B_t

$$B_t = \frac{N^2}{R^2} N_L + N^2 N_a \quad (4)$$

式中 $N \times N$ 为衍射受限的非相干光学系统输入图像 $f(x, y)$ 的总像素数, R 为抽样压缩数 ($R = \frac{N}{N'}$, N 为一维像素数, N' 为一维掩模样点数), N_L 为样值图像每个像素的量化比特数, N_a 为差像每个像素的量化比特数。每个像素上的比特数为

$$B_t/\text{pixel} = \frac{N_L}{R^2} + N_a \quad (5)$$

压缩比定义为原始输入像每个像素的比特数与压缩像每个像素的比特数之比。

当输入图像为二进制图像时, $N_L = N_a = 1$, 则

$$B_t/\text{pixel} = \frac{1}{R^2} + 1 \quad (6)$$

由此可以得出二进制图像每个像素上的比特数在 $[1, 2]$ 区间之内, 仅与抽样压缩数 R 有关。

三、实验研究

3.1 光学插值器的设计

在数字 DPCM 中, 用线性插值函数作为预测函数的预测器, 图 2 中 H 为线性系统的传递函数, ω 为系统频率, T 为系统输入序

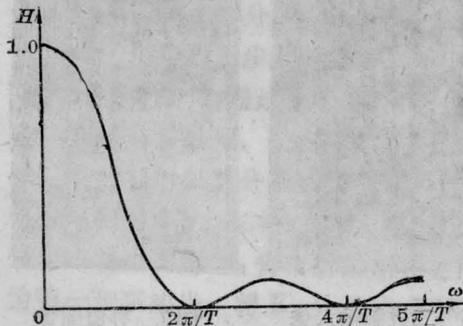


图 2 线性插值函数

列的周期。

实际的非相干光学系统由于孔径光阑的作用, 本身就具有低通的传递特性, 存在截止频率。改变非相干成像系统调制函数 (MTF) 曲线形状和截止频率, 最简单的方法就是改变孔径光阑的大小, 使像面离焦。我们设计出由散焦透镜和可变孔径光阑组成的光学插值器如图 3 所示, 其中 P_1 为物面, P_2 为紧贴透镜 L_2 的可变光阑面, P_3 为像面。因为像面离焦, 实际像面与理想像面相距一个几何尺寸 Δ 。散焦透镜的成像关系如下^[6]

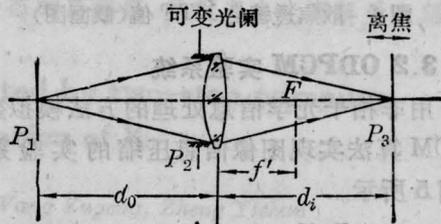


图 3 光学插值器

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_0} - \frac{1}{f} = \varepsilon \quad (7)$$

式中 d_0 是物距, d_i 是像距, f 是焦距, ε 反映了像面的离焦误差。于是, 在系统出瞳上的最大波像差为

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

式中 D 为出瞳直径。图 3 系统的具体参数为: 散焦透镜的焦距 $f=210 \text{ mm}$, $d_0=570 \text{ mm}$, $d_i=332.5 \text{ mm}$, 所用光波长 $\lambda=440 \text{ nm}$ 。当像面离焦量分别为 0.069 mm 、 0.138 mm 、 0.207 mm 、 0.277 mm 时 ($D=375 \text{ mm}$), 在系统的出射瞳孔的边缘位置上分别可以获得 W 为 $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、 $3\lambda/4$ 、 λ 的波像差。系统的调制传递函数曲线绘制在图 4。图 4 的纵坐标为归一化的 MTF, 横坐标为相对空间频率。五条曲线分别为 $W=0$ 、 $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、 $3\lambda/4$ 、 λ 所对应的传递特性。改变 D 的大小和离焦量, 可以得到多种形状的传函曲线。用图 3 系统就可以实现不同特性的低通滤波, 从而可以挑选出所需传递特征曲线实现光学插值器的功能。

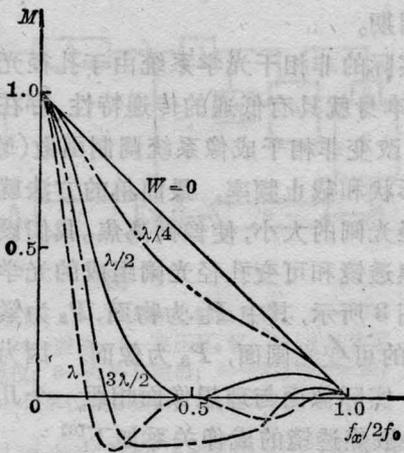


图4 散焦透镜的MTF值(截面图)

3.2 ODFPCM 实验系统

用非相干光学信息处理的方法模拟数字 DPCM 算法实现图像信息压缩的实验系统如图5所示。

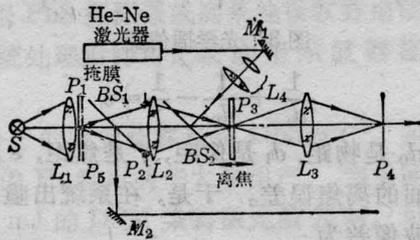


图5 ODFPCM 实验系统

S 为白光光源,位于准直透镜 L_1 的前焦面。 P_1 平面放置待处理的输入图像,由 L_1 准直的平行光均匀照明。在紧贴输入图像的 P_5 平面上,设置光学抽样掩模板,抽样输入图像。抽样后的样值图像由半反半透的分光镜 BS_1 分为两部分,一部分经反射镜 M_2 后直接传输,一部分经由 P_2 面上设置的可变孔径光阑、散焦透镜 L_2 所组成的光学插值器后成像到 P_3 平面上。 BS_2 是反红透蓝的双色膜片, P_3 平面上用实时空间光调制器 PROM 作为记录元件。记录时,挡住激光,仅让经 BS_2 滤波后的蓝光(中心波长 440 nm)曝光 PROM;读出时,关闭白光光源, He-Ne 激光(633nm)经过透镜组 L_4 扩束后射入 PROM,取出 PROM 中记录的图像信息,经成像透镜

L_3 成像到 P_4 平面上输出。散焦像是通过调节精密微调架,移动 P_3 面上的 PROM 所得到的。

实验所用光学抽样器掩模是在不透明屏上等距分布的透明小孔,掩模板外形尺寸为 $24 \times 24(\text{mm}^2)$,小孔直径 0.2 mm,孔心距 0.4 mm,整个掩模板共有透明小孔 60×60 个,分辨率 $2.5 \times 2.5(\text{线对}/\text{mm}^2)$ 。记录介质 PROM 器件可以进行实时处理,器件中的光导晶体硅酸铍具有 Pockel 效应,对蓝光具有最大灵敏度的光导特性,而对红光产生的光导特性灵敏度较小,因此,器件用蓝光(440 nm)记录,用红光(633 nm)读出。通过改变施加给器件的电压极性和幅值, PROM 可以完成图像存贮,对比度反转以及简单的算术运算。利用器件的这些特点,我们不仅可以完成压缩回路的原始输入像和低频插值像的差像运算,还在图5系统中,完成接收端重建原始输入像的工作,即用 PROM 器件完成了经第一通道传输的抽样图像的插值像与存贮在 PROM 器件中的第二通道的差像的相加运算,得到恢复像。

实验中使用图6所示的二进制图像作为原始输入像,图像的强度信息仅为 0 和 1 值,抽样图像 $f_s(x, y)$ 和差值图像 $d(x, y)$ 就无须经量化器量化。这样,就简化了实验装置和过程。图7、图8、图9分别为实验所得到的样值图像 $f_s(x, y)$ 、差像 $d(x, y)$ 和接收



图6 二进制输入像

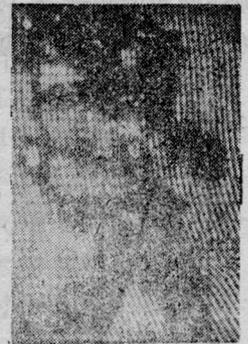


图7 样值图像

(掩膜分辨率 2.5×2.5 线对/ mm^2)



图8 差值像
(离焦量 $\Delta=0.14\text{mm}$)



图9 恢复像

端的恢复像。实验结果足以说明,用非相干光学信息处理手段模拟数字 DPCM 算法实现图像信息压缩是完全可行的。

3.3 实验结果分析

如果用 $n_1(x, y)$ 表示图 1 中第一通道量化和传输的时间平均噪音,用 $n_2(x, y)$ 表示第二通道量化和传输的时间平均噪音,则在接收端的恢复像 $f_r(x, y)$ 可以写成如下形式

$$\begin{aligned} f_r(x, y) &= h(x, y) * [f_s(x, y) + n_1(x, y)] \\ &+ f(x, y) - h(x, y) * f_s(x, y) + n_2(x, y) \\ &= f(x, y) + h(x, y) * n_1(x, y) \\ &+ n_2(x, y) \end{aligned} \quad (9)$$

可见,重建图像有两种噪音成分:差值噪音 $n_2(x, y)$ 与数字 DPCM 的差值噪音相等; $h(x, y) * n_1(x, y)$ 则是本系统特有的,为掩模抽样的噪音与插值函数的卷积。对于可看成平稳随机过程的噪音序列,其均值趋于零^[7],

用插值函数作低通卷积所得到的均值,也使得空间掩模噪音趋于零(正负均可发生),尤其在图像的陡沿附近很少出现误差,这对于图像轮廓的观察是十分有利的。

图 9 所示恢复像的误差除噪音项 $n_1(x, y)$ 与 $n_2(x, y)$ 的影响外,主要是实验所用 PROM 器件产生的。我国研制的第一台 PROM 分辨率仅 7 线对/mm,这样大大降低了恢复像的分辨率;器件的光学质量使得读出像发生面形误差及局部干涉;晶体表面对读出光多次反射所产生的干涉条纹成为差值图像和恢复像的强烈背景,严重损害了恢复像的质量。器件作基线减法时,进行多次曝光,由于外加电压的变化,也会使器件内的电场分布发生某些变化,使读出像对比度衰减。衰减量和曝光光强成指数关系^[8]。也就是说,器件的残余效应降低了恢复像质量。

参 考 文 献

- 1 Abbott R P. IEEE Trans. Commun. Com-19, 3 December 1971: 907~912
- 2 Hunt BR. SPIE, 1977; 119: 85~90
- 3 Hunt B R. Appl. Opt., 1978; 17(8): 2944~2951
- 4 McLaughley D. G. SPIE, 1978; 149: 51~61
- 5 Tamura P N et al. SPIE/OSA, 1976; 74: 57
- 6 Goodman J W. Introduction to Fourier Optics, San Francisco; McGraw-Hill, 1968: 6
- 7 Oppenheim A V, Schaffer RW. Englewood Cliffs: New Jersey; Prentice-Hill, 1975: 8
- 8 Lipson S G et al. Appl. Opt., 1974; 13(9): 2052

(上接第 278 页)

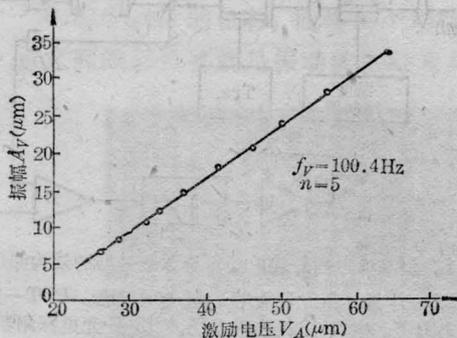


图6 扬声器振幅对所加电压的响应

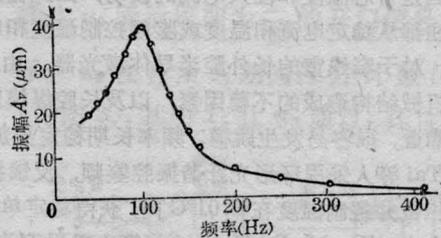


图7 测得的扬声器频响曲线

幅频响应曲线。在振频为 100 Hz 处有一响应峰值,即为此扬声器的低频共振区。

参 考 文 献

- [1] 卓永模,龚兆元. 应用激光, 1984; 4(1): 7