

文章编号 1004-924X(2005)03-0376-09

# 光电混合联合变换相关器中各元 器件结构参数之间的关系

王玉荣,徐 鹏,王青圃,杨永斌,马宝民

(山东大学 信息科学与工程学院 光学系,山东 济南 250100)

**摘要:**分析了空间光调制器(SLM)和面阵 CCD 的像元结构对输入图像和功率谱的抽样,以及抽样对光电混合联合变换相关器(JTC)性能的影响;推导出了光电混合 JTC 中,SLM、面阵 CCD、傅里叶变换透镜、输入图像等各结构参数之间应满足的关系。根据推导出的关系公式,结合实验所用透镜、SLM、CCD 的各项参数,选择不同的图像间距,对联合变换相关识别过程进行了模拟验证。输入大小都为  $32 \times 32$  像素的参考图像和目标图像,当两者间距大于 64 像素且小于 374 像素时,可以得到理想的识别效果;间距小于 64 像素时,同级输出光场的自相关和互相关信号不能完全分离;间距大于 374 像素时,相邻两级互相关信号交叠错位;当间距大到超过 405 像素时,无法进行相关识别。模拟结果与理论推导一致。这些关系对 JTC 的设计及应用有重要意义。

**关键词:**光学图像相关识别;联合变换相关器;空间光调制器

**中图分类号:**O438 **文献标识码:**A

## Relationship between parameters in hybrid optical/electronic joint transform correlator

WANG Yu-rong, XU Peng, WANG Qing-pu, YANG Yong-bin, MA Bao-min

*(Department of Optics, School of Information Science and  
Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)*

**Abstract:** Based on the grid pixel structure of spatial light modulator(SLM) and CCD used in a hybrid optical/electronic joint transform correlator(JTC), the relationship among the structure parameters of SLM, CCD, Fourier transform lens and input images are presented. According to the relations, the JTC recognition processes are simulated with different distance between the object and the reference image which are equal in size:  $32 \times 32$  pixels. When the distance of the two input images is 64 pixels to 374 pixels, a perfect recognition result can be obtained. When the distance is less than 64 pixels, self-correlation peak and cross-correlation peak in the same order output signals can not be separated complete-

收稿日期:2005-03-22;修订日期:2005-04-18.

基金项目:山东省自然科学基金课题(No. Y2004G01)

ly. The distance of more than 374 pixels results in the overlap of adjacent of correlation signals, and when the distance is more than 405 pixels, the JTC can not recognize the two input images. These simulation results have proved the theoretical analysis. The relationship is important to the configuration and application of JTC.

**Key words:** optical image correlation recognition; joint transform correlator; spatial light modulator

## 1 引言

联合变换相关器<sup>[1-2]</sup> (Joint transform correlator-JTC)是光学图像相关识别的基本结构之一,也是其他许多光学信息处理系统的基本结构,如光计算与光神经网络<sup>[3]</sup>、光学图像加密隐藏<sup>[4-5]</sup>、SAR 图像处理<sup>[6]</sup>等。在光电混合 JTC<sup>[7-9]</sup>中,通常采用实时空间光调制器 (Spatial light modulator)输入图像,采用面阵 CCD 探测联合变换功率谱 (Joint transform power spectrum)和相关信号,SLM 和 CCD 都具有分立像元结构,这将造成对输入图像的抽样。为避免抽样对识别性能的不利影响,需要适当选取 JTC 中各元器件的结构参数并协调它们之间的关系。

Gianino<sup>[10-11]</sup>等人分析了空间光调制器“坏区”(dead-zone,空间光调制器像元结构中电极所在的区域)对光学相关器的影响,并给出了计算机模拟的结果。Davis<sup>[12]</sup>等人分析了空间光调制器和面阵 CCD 的抽样与二值化对联合变换相关器的影响。本文以单 SLM、单透镜光电混合 JTC<sup>[8-9]</sup>为例,导出了 JTC 中,SLM、面阵 CCD、傅里叶变换透镜、输入图像等各结构参数之间应满足的关系,并进行了数字模拟。

## 2 单 SLM、单傅里叶变换透镜光电混合联合变换相关器的结构及原理

单 SLM、单透镜光电混合 JTC<sup>[8-9]</sup>光路

结构如图 1 所示。设目标图像  $f(x_1)$  和参考图像  $h(x_1)$  在输入面上的中心坐标分别为  $(b_f, 0)$  和  $(-b_h, 0)$ , 则 SLM 上的输入图像可表示为:

$$g(x_1) = f(x_1) * \delta(x_1 - b_f) + h(x_1) * \delta(x_1 + b_h), \quad (1)$$

式中  $*$  是卷积运算符。在频谱面上 (CCD 接收面) 接收得到  $|G(x_2)|^2$  或  $|G(\xi)|^2$  称为输入图像的联合变换功率谱 (JTPTS)。由微机控制把 JTPTS 显示在 SLM 上,经逆傅里叶变换在输出面上得到的输出光场<sup>[13]</sup>:

$$E(x_2) = f(x_2) \otimes f(x_2) + h(x_2) \otimes h(x_2) + f(x_2) \otimes h(x_2) * \delta[x_2 - (b_f + b_h)] + h(x_2) \otimes f(x_2) * \delta[x_2 + (b_f + b_h)], \quad (2)$$

式中  $\otimes$  是相关运算符。输出光场有 4 项,第 1 和第 2 项是两图像的自相关,重叠于输出面的坐标原点处;第 3 项和第 4 项是需要探测的互相关信号,分别位于自相关信号的两侧。

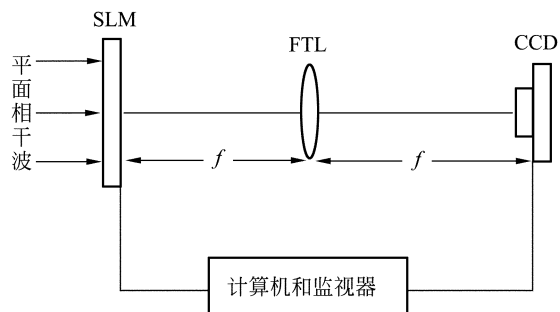


图 1 单 SLM、单透镜光电混合 JTC 结构图  
Fig. 1 Fourier transform lens JTC using single SLM and Fourier transform lens

### 3 光电混合联合变换相关器中各元器件结构参数之间的关系

图 2 是电寻址薄膜晶体管液晶空间光调制器(TFT-LCSLM)像元结构示意图,其中黑色的网格区域表示不透光的电极,灰色的矩形区域表示 SLM 的像元透光区

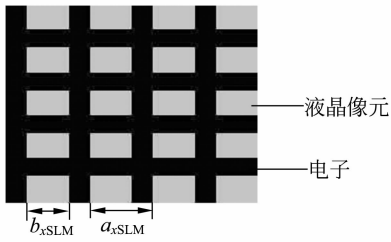


图 2 TFT-LCSLM 的像元结构

Fig. 2 Pixel dimension of TFT-LCSLM

域。在 SLM 上显示的图像(或 JTPS)被 SLM 抽样,抽样间隔就是 SLM 的像元间距  $a_{xSLM}$ ,由抽样定理知,在 SLM 上显示图像的最高空间频率为:

$$\xi_{\max} = 1/2a_{xSLM} \quad (3)$$

SLM 上显示的抽样后的输入图像  $t(x_1)$  可表示为:

$$t(x_1) = \left\{ \left[ g(x_1) \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x_1 - ma_{xSLM}) \right] \times \text{rect} \left( \frac{x_1}{b_{xSLM}} \right) \right\} \times \text{rect} \left( \frac{x_1}{L_x} \right) \quad (4)$$

式(4)中,  $b_{xSLM}$  是 SLM 每个像元中透光区域  $x$  方向的宽度,  $L_x$  是整个 SLM 在  $x$  方向的宽度。设 SLM 在  $x$  方向有  $N_{xSLM}$  个像元,则  $L_x = N_{xSLM} a_{xSLM}$ 。在单位振幅相干平面波入射下,经透镜作傅里叶变换,由于  $L_x$  远大于  $b_{xSLM}$ ,所以可忽略 SLM 边框的衍射效应。在输出面上可得输入图像  $t(x_1)$  的频谱  $T(\xi)$ :

$$T(\xi) = \left[ G(\xi) * \frac{1}{a_{xSLM}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\xi - \frac{m}{a_{xSLM}}) \right] b_{xSLM} \text{sinc}(b_{xSLM}\xi) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,由于 SLM 的分立像元结构对于输入图像的抽样,造成了输入图像频谱的空间周期性重复。在频谱面上出现了多级频谱,零级频谱的中心位于谱面坐标原点处,第  $m$  级频谱的中心距原点的距离为  $(m\lambda f)/a_{xSLM}$ ;各高级次频谱的分布形式及宽度与零级频谱相同,但由于受到函数  $\text{sinc}(b_{xSLM}\xi)$  的调制,其强度随  $m$  的增加而迅速减小。在用 CCD 探测 JTPS 时,应探测到完整的零级频谱,由频谱面上频率坐标与空间坐标的关系  $\xi = x_2/(\lambda f)$  可知,CCD 靶面  $x$  方向上的宽度至少应为  $2\xi_{\max}\lambda f = (\lambda f)/a_{xSLM}$ 。若 CCD 靶面像元大小为  $a_{xCCD}$ (设 CCD 靶面像元间无间隙), $x$  方向上有  $N_{xCCD}$  个像元,则下式成立:

$$N_{xCCD} a_{xCCD} \geq \lambda f / a_{xSLM} \quad (6)$$

式(6)表示在 SLM 像元间距、CCD 像元宽度以及透镜焦距一定时,CCD 应有的像元数。此式还可表示为:

$$f \leq \frac{N_{xCCD} a_{xCCD} a_{xSLM}}{\lambda} \quad (7)$$

式(7)表示若 CCD 像元宽度、SLM 像元间距及光波波长一定时,透镜焦距的取值范围。

此外,JTPS 是参考图像频谱与目标图像频谱的干涉图样,其条纹结构的空间频率<sup>[14]</sup>为  $(b_f + b_h)/(\lambda f)$ 。使用 CCD 探测 JTPS 时,CCD 的空间分辨率应大于 JTPS 的空间频率,应有下式成立:

$$b_f + b_h \leq \lambda f / 2a_{xCCD} \quad (8)$$

式(8)表示输入面上目标图像与参考图像之间距离、CCD 像元大小、透镜焦距及光波波长应满足的关系。

若式(6)中取等号,即 CCD 刚好探测到完整零级谱,被 CCD 像元抽样的 JTPS 用空间频率坐标表示为:

$$P(\xi) = \{ |G(\xi)|^2 \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\xi - \frac{n a_{x\text{CCD}}}{\lambda f}) \} * \text{rect}\left(\frac{\xi \lambda f}{a_{x\text{CCD}}}\right) \times \text{rect}\left(\frac{\xi \lambda f}{N_{x\text{CCD}} a_{x\text{CCD}}}\right), \quad (9)$$

用计算机将式(9)所表示的 JTPS 显示在输入面的 SLM 上, SLM 上显示的 JTPS 用空间频率坐标表示为:

$$P'(\xi') = \{ |G(M\xi')|^2 \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(M\xi' - \frac{n a_{x\text{CCD}}}{\lambda f}) \} * \text{rect}\left(\frac{\xi' \lambda f}{b_{x\text{SLM}}}\right) \times \text{rect}\left(\frac{\xi' \lambda f}{N_{x\text{CCD}} a_{x\text{SLM}}}\right), \quad (10)$$

式中  $\xi'$  是 JTPS 显示到 SLM 上的空间频率坐标,  $\xi' = \xi/M$ ;  $M = a_{x\text{CCD}}/a_{x\text{SLM}}$ , 是由 CCD 和 SLM 像元大小不同所决定的缩放因子;  $N_{x\text{CCD}} a_{x\text{SLM}}$  是 JTPS 显示到 SLM 上的宽度。在单位振幅相干平面波入射下, 在输出面上的光场分布为:

$$E'(x_2) = \frac{b_{x\text{SLM}}}{a_{x\text{CCD}}} [E(x_2) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x_2 - \frac{nM\lambda f}{a_{x\text{CCD}}})] \times \text{sinc}\left(\frac{b_{x\text{SLM}}}{\lambda f} x_2\right) = \frac{b_{x\text{SLM}}}{a_{x\text{CCD}}} [E(x_2) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x_2 - \frac{n\lambda f}{a_{x\text{SLM}}})] \times \text{sinc}\left(\frac{b_{x\text{SLM}}}{\lambda f} x_2\right), \quad (11)$$

其中,  $E(x_2) = F\{|G(M\xi')|^2\}$

$$\begin{aligned} &= \left[ f\left(\frac{x_2}{M}\right) \text{rect}\left(\frac{x_2}{wM}\right) \right] \otimes \\ &\left[ f\left(\frac{x_2}{M}\right) \text{rect}\left(\frac{x_2}{wM}\right) \right] + \\ &\left[ h\left(\frac{x_2}{M}\right) \text{rect}\left(\frac{x_2}{wM}\right) \right] \otimes \\ &\left[ h\left(\frac{x_2}{M}\right) \text{rect}\left(\frac{x_2}{wM}\right) \right] + \\ &\left[ f\left(\frac{x_2}{M}\right) \text{rect}\left(\frac{x_2}{wM}\right) \right] \otimes \\ &\left[ h\left(\frac{x_2}{M}\right) \text{rect}\left(\frac{x_2}{wM}\right) \right] * \\ &\delta[x_2 - M(b_f + b_h)] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left[ h\left(\frac{x_2}{M}\right) \text{rect}\left(\frac{x_2}{wM}\right) \right] \otimes \\ &\left[ f\left(\frac{x_2}{M}\right) \text{rect}\left(\frac{x_2}{wM}\right) \right] * \\ &\delta[x_2 + M(b_f + b_h)], \quad (12) \end{aligned}$$

在式(12)中略去了各项前面的常数因子  $(1/M^4)$ 。由式(11)和式(12)可知, 在单 SLM、单透镜 JTC 中, 由于采用 CCD 探测 JTPS, 并将之显示在 SLM 上, 造成了对 JTPS 的抽样, 所以最后得到的输出光场存在多级衍射, 是没有抽样时的输出光场的周期性重复。图 3 所示是输出平面上输出光场分布的示意图。

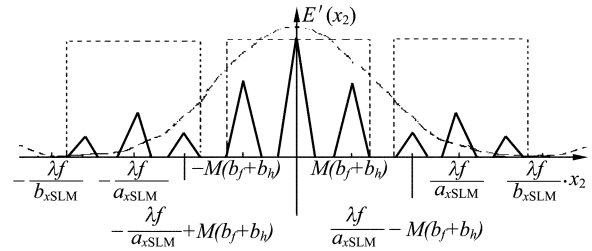


图3 相关输出光场分布示意图

Fig. 3 Sketch of output correlation distribution

图3中曲线表示式(11)中  $\text{sinc}(b_{x\text{SLM}} x_2 / \lambda f)$  的调制作用, 它的第一零点位于  $\pm \lambda f / b_{x\text{SLM}}$  处。每个虚线矩形框内的分布由  $E(x_2)$  决定, 表示各级次相关输出光场的分布。各级相关输出光场的中心位于  $(n\lambda f) / a_{x\text{SLM}}$  处 ( $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), 强度随  $n$  的增加迅速减小; 相邻两相关输出光场的中心距离为  $\lambda f / a_{x\text{SLM}}$ , 它是由 SLM 像元间距决定的。探测相关信号时只能在零级相关输出光场中探测。

由式(12)可知, 零级相关输出包含有 4 项, 第 1、第 2 项分别是参考图像和目标图像的自相关, 二者重叠位于输出面的坐标原点处, 最大宽度为  $2Mw$ ; 第 3 项和第 4 项正是所需要探测的互相关信号, 位于自相关信号的两侧, 中心坐标分别为  $x_3 = \pm M$

$(b_f + b_h)$ , 二者的最大宽度均为  $2M\omega$ 。为避免同一级相关输出中自相关项与互相关项的交叠, 应有  $M(b_f + b_h) \geq 2M\omega$ , 即:

$$b_f + b_h \geq 2\omega, \quad (13)$$

此式表示输入面上图像间距与图像宽度应满足的关系。为了避免零级相关输出光场中的互相关项与一级相关输出中的互相关项交叠, 应有  $M(b_f + b_h) + M\omega \leq \lambda f / 2a_{xSLM}$  成立, 将  $M = a_{xCCD} / a_{xSLM}$  代入得:

$$(b_f + b_h) + \omega \leq \lambda f / 2a_{xCCD}, \quad (14)$$

式(14)表示了输入面上图像间距、图像宽度与像元大小、透镜焦距、光波长之间应满足的关系。比较式(8)和式(14)可知,  $(b_f + b_h)$  只要满足式(14)即可。设输入面上的图像间距和每个图像宽度所对应的像元数分别为  $N_{fh}$  和  $N_i$ , 即  $b_f + b_h = N_{fh}a_{xSLM}$ ,  $\omega = N_i a_{xSLM}$ ; 则式(13)和(14)分别变换为下列两式:

$$N_{fh} \geq 2N_i, \quad (15)$$

$$N_{fh} + N_i \leq \lambda f / 2a_{xSLM} a_{xCCD}. \quad (16)$$

式(13)、(14)或式(15)、(16)是在 SLM 和 CCD 的像元大小、透镜焦距和光波波长一定时, 目标图像和参考图像各自的宽度以及两者之间的距离应满足的关系。又知孔径为  $D$ 、焦距为  $f$  的傅里叶变换透镜的截止频率为<sup>[14]</sup>:  $\rho = (D - D') / (2\lambda f)$ , 式中  $D'$  是整个输入图像的宽度,  $D' = (N_{fh} + N_i) a_{xSLM}$ ,  $\lambda$  是光波波长。SLM 上显示图像的最高空间频率  $\xi_{max}$  由式(3)表示。所以, 应有  $\rho \geq \xi_{max}$  成立, 由式(3)和该式整理可得:

$$D \geq (N_{fh} + N_i) a_{xSLM} + \lambda f / a_{xSLM}, \quad (17)$$

该式表示了 SLM 像元间距及整个输入图像像元数一定的情况下, 透镜孔径和焦距应满足的关系。

SLM 和 CCD 的空间分辨率由它们像元大小或像元间距决定; 而像元大小受到制作技术和工艺水平的限制。在构造光电混合 JTC 时, 这些参数的选取受现有器件

的限制, 不能任意选取。可将 SLM 和 CCD 的像元参数作为设计选取光路结构参数的依据, 根据由式(6)、(7)、(15)、(16)及(17)所确定的关系选取 JTC 的其他元件中的结构参数。例如, TFT-LCSLM (英国 CRL Opto 公司的 XGA2L11 型) 的主要参数为: 像元数  $N_{xSLM} = 1024$ , 像元间距  $a_{xSLM} = 26 \mu\text{m}$ , 每个像元中透光区域  $b_{xSLM} = 23 \mu\text{m}$ , 所用 CCD 相机的像元大小  $a_{xCCD} = 9 \mu\text{m}$ , 像元数  $N_{xCCD} = 1024$ , 光波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 。根据(7)式, 傅里叶透镜的焦距  $f \leq 378.659 \text{ mm}$ ; 取  $f = 378.659 \text{ mm}$ , 由式(16)可得 JTC 整个输入图像的总宽度应满足  $(N_{fh} + N_i) \leq 512$  个像元; 取  $(N_{fh} + N_i) = 512$ , 由式(17)可得傅里叶变换透镜的孔径  $D$  应满足  $D \geq 22.528 \text{ mm}$ ; 由式(15)和(16)可知参考图像(或目标图像)的宽度应满足  $N_i \leq 170$  个像元。以上这些参数的取值是在假设 CCD 的像元数 ( $N_{xCCD}$ ) 被充分利用的情况下得到的, 在此种情况下, SLM 的像元数没有得到充分利用。

## 4 计算机模拟结果

在计算机模拟中, 采用下列参数: 傅里叶透镜焦距  $f = 300 \text{ mm}$ 、孔径  $D = 50 \text{ mm}$ ;

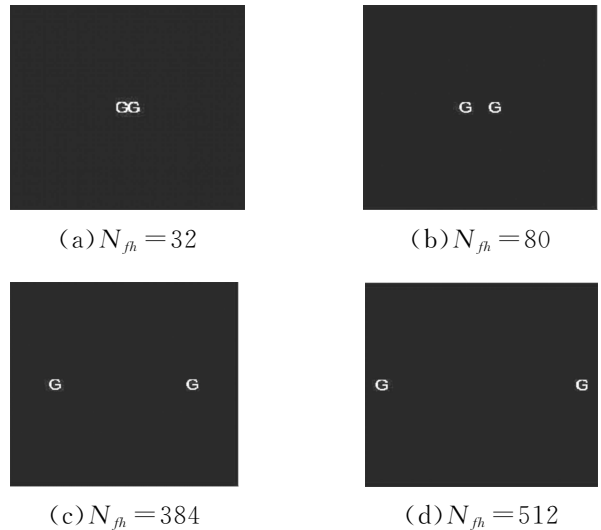
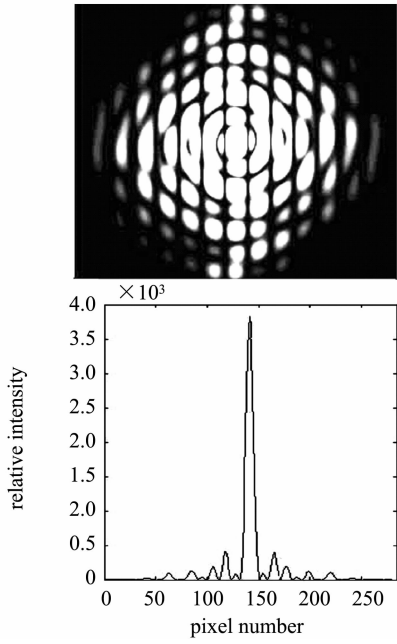


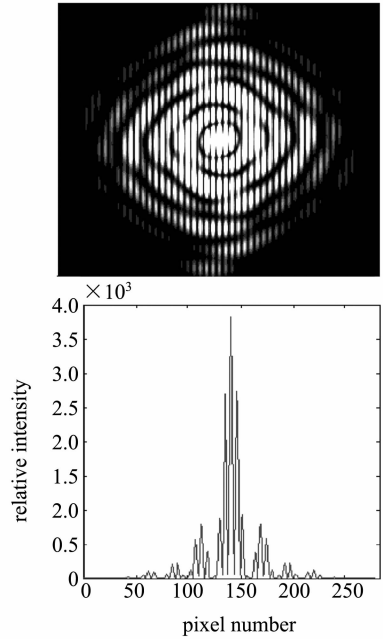
图 4 输入图像

Fig. 4 Input image to the JTC



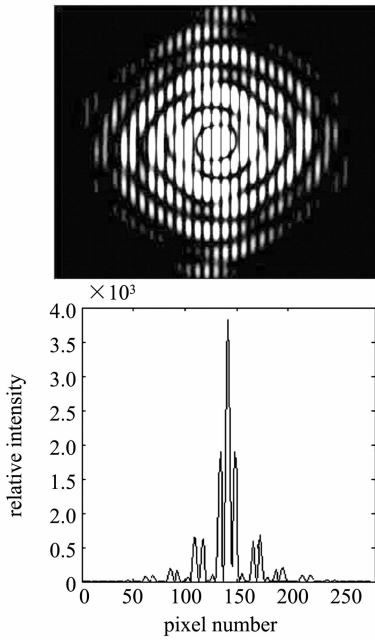
(a)与  $N_{fb}=32$  对应的 JTPS

(a)The JTPS corresponding to  $N_{fb}=32$



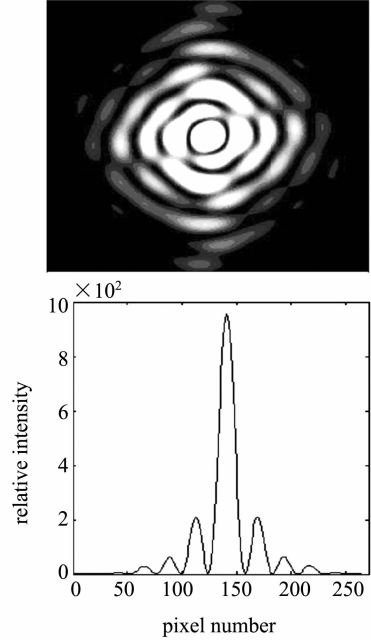
(c)与  $N_{fb}=384$  对应的 JTPS

(c)The JTPS corresponding to  $N_{fb}=384$



(b)与  $N_{fb}=80$  对应的 JTPS

(b)The JTPS corresponding to  $N_{fb}=80$

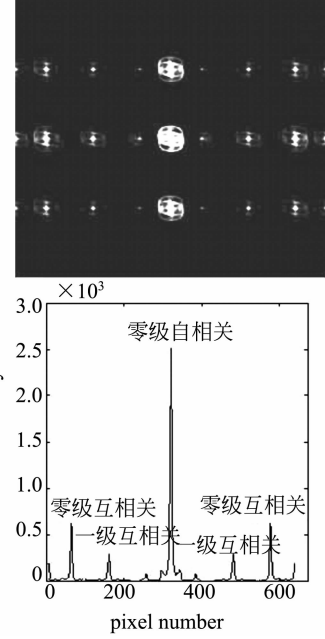
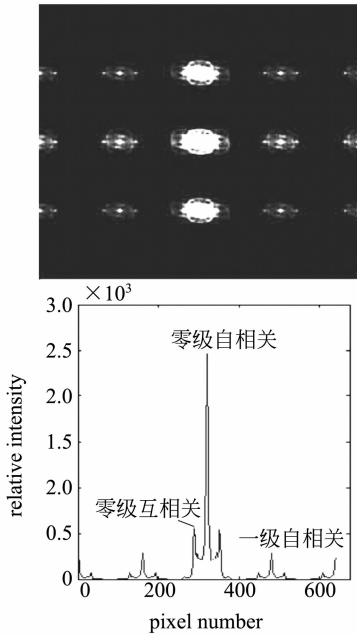


(d)与  $N_{fb}=512$  对应的 JTPS

(d)The JTPS corresponding to  $N_{fb}=512$

图 5 与输入图像对应的联合变换功率谱(JTPS)

Fig. 5 JTPS of input image

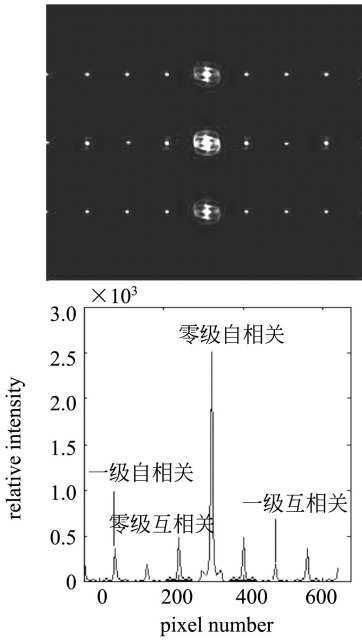


(a) 互相关与自相关不能分离的输出信号

(a) The output of indistinguishable self-correlation peak and cross-correlation peak

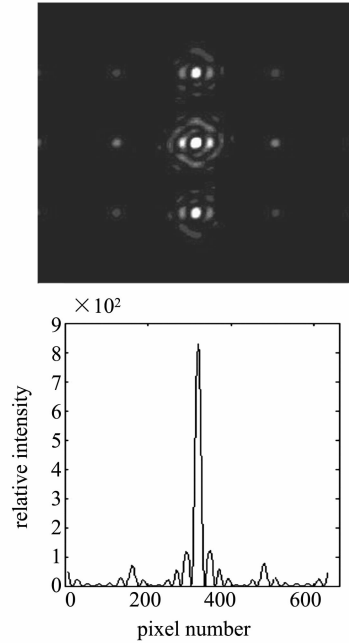
(c) 存在交叠错位的相关输出

(c) The overlap of adjacent of output correlation signals



(b) 理想的相关输出

(b) The perfect output correlation distribution



(d) 无明显相关信号输出

(d) No clear output correlation distribution

图 6 输入图像对应的相关输出光场

Fig. 6 Output correlation distribution of the JTC using a SLM at the input plane

SLM(英国 CRL Opto 的 XGA2LII 型)的像元参数: $a_{x\text{SLM}}=26\ \mu\text{m}$ 、 $b_{x\text{SLM}}=23\ \mu\text{m}$ 、像元数  $N_{x\text{SLM}}=1\ 024$ ; CCD 的像元大小  $a_{x\text{CCD}}=9\ \mu\text{m}$ 、像元数  $N_{x\text{CCD}}=1\ 024$ 。采用 2 个相同的“G”字母分别作为 JTC 的参考图像和目标图像,二者的宽度均为  $32\times 32$  个像元,即  $N_i=32$ ,如图 4 所示。由式(8)、(15)、(16)可知,此时整个输入图像的宽度( $N_{jn}+N_i$ )应小于 405,两图像间距  $N_{jn}$  应大于 64 且小于 374,否则将影响识别性能。图 4(a)中的  $N_{jn}=32$ ,满足式(8)和式(16)但不满足式(15);图 4(b)中的  $N_{jn}=80$ ,同时满足式(8)、(15)和(16);图 4(c)中的  $N_{jn}=384$  满足式(15)和(8),但不满足式(16);图 4(d)中的  $N_{jn}=512$ ,满足式(15)但不满足式(16)和(8)。

图 5(a)、(b)、(c)、(d)所示分别是与图 4(a)、(b)、(c)、(d)对应的 JTPS,每个图上部是二维强度分布,下部是在  $x$  轴上的一维分布曲线。由图 5(a)(b)(c)可以看出,当满足式(8)时,JTPS 条纹结构的空间频率小于 CCD 的空间分辨率,能够被记录下来;由图 5(d)可以看出,此时由于不满足式(8),JTPS 条纹结构的空间频率大于 CCD 的空间分辨率,CCD 无法记录过于细密的条纹,所以只能得到 JTPS 亮暗分布的大体轮廓。

图 6(a)、(b)、(c)、(d)分别是与图 4(a)、(b)、(c)、(d)相对应的相关输出。由图 6(a)所示可知,由 CCD 可以探测到可分辨的 JTPS,但每一级相关输出光场中,互相关信号与零级自相关信号不能完全分离。由图 6(b)可知,由于此时  $N_{jn}$  同时满足式(8)、(15)和(16),所以每一级相关输出光场中的互相关信号既能与同级自相关信号分离,又能与相邻的高级相关输出光场中的互相关信号分离,这是设计 JTC 时应达到的要求。由图 6(c)可知,此时的

$N_{jn}$  取值尽管能够得到可分辨的 JTPS,但由于不满足式(16),以至于相邻两级相关输出光场中的互相关信号之间在位置上出现交叠错位,不利于互相关信号的探测。由图 6(d)可知,此时输出光场中,能量分布弥散,无法分辨出相关输出信号,这是因为  $N_{jn}$  太大,不满足式(8),JTPS 条纹结构的频率已超过 CCD 的空间分辨率,不能记录下清晰的 JTPS 条纹;图(6)中的亮点及峰值不是相关信号,它们在相关识别中会造成误判,这是绝对不允许的。

## 5 结束语

在光电混合 JTC 中,SLM 和 CCD 的像元结构是对输入图像和联合变换功率谱的抽样,抽样后的输入图像的空间频谱是未抽样输入图像空间频谱的空间周期性复制,这限制了输入图像的最高空间频率和 CCD 的结构参数,而且抽样后的功率谱进行傅里叶变换所得到的相关信号也是空间周期性重复的。为了避免这种空间周期性重复对 JTC 性能的影响,需要适当选取 JTC 中各元器件的结构参数并协调它们之间的关系。根据推导出的关系公式,结合实验所用透镜、SLM、CCD 的各项参数,本文选择不同的图像间距,对联合变换相关识别过程进行了模拟。对于两个大小都为  $32\times 32$  像素的输入图像,当两者间距大于 64 像素且小于 374 像素时,可以得到理想的识别效果;间距小于 64 像素,则同级输出光场的自相关和互相关信号不能完全分离;间距大于 374 像素时,相邻两级互相关信号交叠错位;当间距大到超过 405 像素时,无法进行相关识别。模拟结果与理论推导吻合。推导出的这些关系对 JTC 的设计及应用有重要意义。

## 参考文献:

- [1] WEAVER C S, GOODMAN J W. A technique for optically convolving two functions[J]. *Appl. Opt.*, 1966, 5(2): 1248-1249.
- [2] WANG Y R, CAI L ZH, WANG H, *et al.* Moving target recognition and tracking with photorefractive joint transform correlator[J]. *SPIE*, 1996, 2896: 189-197.
- [3] ZHANG SH Q, KARIM A. Cellular neural network implementation using a phase-only joint transform correlator[J]. *Opt. Commun.*, 1999, 162(1): 31-36.
- [4] NOMURA T, JAVIDI B. Optical encryption using a joint transform correlator architecture[J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39(8): 2031-2035.
- [5] ABOOKASIS D, ARAZI O, ROSEN J, *et al.* Security optical systems based on a joint transform correlator with significant output images[J]. *Opt. Eng.*, 2001, 48(8): 1584-1589.
- [6] 文大化. SAR 光学处理器输出图像的实时处理装置[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(2): 19-25.  
WEN D H. Real-time processing system of SAR optical processor's image[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(2): 19-25. (in Chinese)
- [7] FENG L, MASHHIDE I, TOYOHICO Y. Adaptive binary joint transform correlator for image recognition[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(35): 7416-7420.
- [8] FIELDING K H, HORNER J L. 1-f joint transform correlator[J]. *Opt. Eng.*, 1990, 29(9): 1081-1087.
- [9] JAVIDI B, HORNER J L. Single SLM joint transform correlator[J]. *Appl. Opt.*, 1989, 28(5): 1027-1032.
- [10] GIANINO P D, WOODS C L. Effects of spatial light modulator opaque dead zones on optical correlation[J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(20): 4025-4032.
- [11] GIANINO P D, WOODS C L. General treatment of spatial light modulator dead-zone effects on optical correlation. II. Mathematical analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(32): 6536-6541.
- [12] DAVIS J A, BUNCH R M. Effect of sampling and binarization in the output of the joint Fourier transform correlator[J]. *Opt. Eng.*, 1990, 29(9): 1095-1100.
- [13] 王玉荣, 李骏, 胡家升. 联合变换相关器中参数之间的协调关系[J]. *光学精密工程*. 1995, 3(1): 40-44.  
WANG Y R, LI J, HU J SH. Relationship of parameters in joint transform correlator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, 3(1): 40-44. (in Chinese)
- [14] 苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
SU X Y, LI J T. *Information optics*[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese).

**作者简介:**王玉荣(1965—):男,教授,山东大学信息学院信息光学研究所所长。1992年毕业于中国科学院长春光机所,获理学硕士学位,主要从事物理光学、信息光学及光信息处理、全息干涉检测等方面的教学和科研工作。Email:yrw@sdu.edu.cn