

# 利用液晶光阀实现二值化联合变换 相关器的研究

王 滨 余飞鸿 刘 旭 顾培夫 唐晋发

(浙江大学光科系现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘 要** 二值化联合变换相关器, 通过对联合变换的功率谱进行二值化操作, 可以提高联合变换相关器的图像识别能力。本文正是基于此观点, 首次提出利用液晶光阀本身的饱和区实现反转二值化联合变换功率谱。实验表明, 利用液晶光阀的反转二值化调制, 相关性能得到很大提高。计算机模拟的结果与实验相符。系统简单, 全光学, 无需加入电子阈值系统调制联合变换功率谱。

**关键词** 联合变换相关识别, 二值化非线性调制, 联合功率谱。

## 1 引 言

光学相关图像识别是图像识别的一个重要分支, 主要分匹配滤波相关器和联合变换相关器(Joint Transform Correlator)两大类。联合变换相关识别是 Weaver 和 Goodman 在 1966 年提出的。随后, Javidi 进行了大量的研究工作。联合变换相关器优于匹配滤波相关器。它无需预先制备匹配滤波器, 光学系统调校简单, 较易实现。特别是近年来随着空间光调制器等光学实时器件的不断发展和完善, 使得联合变换相关器具有自适应能力, 在空间飞行自动着陆, 机器人视觉, 目标跟踪等方面有着巨大的潜在应用前景, 吸引了众多研究者的注意。

Javidi 提出了非线性联合变换相关器<sup>[1, 2]</sup>(Nonlinear Joint Transform Correlator), 通过对联合变换相关器的联合功率谱(Joint Power Spectrum)进行非线性操作, 使其在图像识别能力方面有很大的提高。二值化联合变换相关器<sup>[3~5]</sup>(Binary Joint Transform Correlator)作为非线性操作的一种, 是将联合功率谱阈值化为两种值(-1, 1)或(0, 1)。与经典的联合变换相关器相比, 二值化联合变换能够产生高的相关峰值, 高的峰值旁瓣比, 窄的相关宽度, 及更好的分辨率。但是, 目前实现联合功率谱的二值化都是先在焦平面用 CCD 探测器记录联合变换功率谱, 再将此功率谱送入计算机进行二值化处理, 最后将二值化的功率谱输出到光阀。这不仅耗去大量的计算时间, 影响实时性; 而且需考虑 CCD 的动态范围和分辨率能否与功率谱相匹配<sup>[6]</sup>。

事实上, 液晶光阀(Liquid Crystal Light Valve)作为实时空间光调制器, 不仅可以作为功率谱的显示器件, 而且可以利用其输入输出特性曲线达到非线性调制的目的<sup>[7]</sup>。实验中发

\* 本工作得到国家自然科学基金青年基金和浙江大学现代光学仪器国家重点实验室的资助。

收稿日期: 1996 年 1 月 20 日; 收到修改稿日期: 1996 年 4 月 15 日

现, 在通常的工作条件下仅仅通过增加液晶光阀的工作电压使其工作在反转饱和状况就可得到近似二值化非线性调制。实验结果与计算机模拟的结果接近。系统简单, 无需电子阈值网络的处理。

## 2 二值化联合变换功率谱的理论分析

采用光寻址液晶光阀的非线性联合变换相关器的结构模型如图 1 所示。

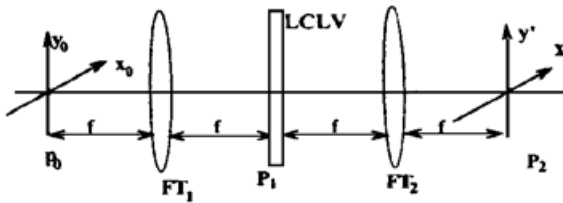


Fig. 1 The configuration of nonlinear joint transform correlator with LCLV

设输入图像和参考图像并置在输入平面  $p_0$ , 两图像在  $x$  方向上分开  $2x_0$  距离, 分别用数学函数表示为  $s(x - x_0, y)$ 、 $r(x + x_0, y)$ , 在  $p_1$  平面上的光场分布  $E(\alpha, \beta)$  表示为:

$$E(\alpha, \beta) = s(\alpha, \beta) \exp [i\Phi_s(\alpha, \beta)] \times \exp (ix_0\alpha) + R(\alpha, \beta) \exp [i\Phi_R(\alpha, \beta)] \times \exp (-ix_0\alpha) \quad (1)$$

式中  $(\alpha, \beta)$  为空间角频率坐标, 其中  $\alpha = 2\pi f_x$ ,  $\beta = 2\pi f_y$ , 而  $f_x = \frac{x_1}{\mathcal{M}}$ ,  $f_y = \frac{y_1}{\mathcal{M}}$ ,  $S(\alpha, \beta) \exp [i\Phi_s(\alpha, \beta)]$  和  $R(\alpha, \beta) \exp [i\Phi_R(\alpha, \beta)]$  分别是  $s(x, y)$  和  $r(x, y)$  的傅里叶谱, 其中  $S(\alpha, \beta)$  和  $R(\alpha, \beta)$  是傅里叶变换的振幅频谱,  $\Phi_s(\alpha, \beta)$  和  $\Phi_R(\alpha, \beta)$  是傅里叶变换的位相频谱。由于光寻址型液晶光阀仅对写入谱的光强敏感, 相当于平方律器, 干涉强度分布  $I(\alpha, \beta)$  (即联合变换功率谱(JPS))为

$$I(\alpha, \beta) = |E(\alpha, \beta)|^2 = S^2(\alpha, \beta) + R^2(\alpha, \beta) + 2S(\alpha, \beta) R(\alpha, \beta) \cos [2x_0\alpha + \Phi_s(\alpha, \beta) - \Phi_R(\alpha, \beta)] \quad (2)$$

经典的联合变换相关器对(2)式直接进行傅里叶变换, 在  $P_2$  输出平面上产生相关信号  $h(x', y')$ :

$$h(x', y') = r \star r + s \star s + (r \star s) \odot \delta(x' - 2x_0, y') + (s \star r) \odot \delta(x' + 2x_0, y') \quad (3)$$

式中  $\star$  和  $\odot$  分别代表相关和卷积运算。

非线性联合变换是对(3)式取阈值后再进行傅里叶变换。二值化的联合功率谱  $I_b(\alpha, \beta)$  由下式给出:

$$I_b(\alpha, \beta) = \begin{cases} 1 & R^2(\alpha, \beta) + S^2(\alpha, \beta) + 2R(\alpha, \beta)S(\alpha, \beta) \cos [2x_0\alpha + \Phi_R(\alpha, \beta) - \Phi_s(\alpha, \beta)] \geq V_T \\ 0 & R^2(\alpha, \beta) + S^2(\alpha, \beta) + 2R(\alpha, \beta)S(\alpha, \beta) \cos [2x_0\alpha + \Phi_R(\alpha, \beta) - \Phi_s(\alpha, \beta)] < V_T \end{cases} \quad (4)$$

$V_T$  是预先设置好的阈值。假设(2)式的  $[R^2(\alpha, \beta) + S^2(\alpha, \beta)]$ ,  $[R(\alpha, \beta)S(\alpha, \beta)]$ ,  $\Phi_s(\alpha, \beta)$  和  $\Phi_R(\alpha, \beta)$  相对于  $\cos(2x_0\alpha)$  变化非常缓慢, 那么功率谱近似周期变化。液晶光阀二值化调制的作用是将振幅调制的功率谱转换为脉冲调制。振幅影响脉冲的宽度, 而位相差影响脉冲在傅里叶平面上的位置。定义  $1/2x_0$  为周期性联合变换功率谱的周期,  $d$  是振幅透射率为 1 的脉冲宽度。由于假设位相函数  $\Phi_s(\alpha, \beta)$  和  $\Phi_R(\alpha, \beta)$  变化极其缓慢, 可近似为常数, 脉冲宽度和功率谱之间的关系如(5)式所示:

$$R^2(\alpha, \beta) + S^2(\alpha, \beta) + 2R(\alpha, \beta)S(\alpha, \beta) \cos [2x_0(2\pi d/2)] = V_T \quad (5)$$

即当条件  $\left| \frac{V_T - R^2(\alpha, \beta) - S^2(\alpha, \beta)}{2R(\alpha, \beta)S(\alpha, \beta)} \right| \leq 1$  成立时,  $d = \frac{1}{2\pi x_0} \cos^{-1} \left[ \frac{V_T - R^2(\alpha, \beta) - S^2(\alpha, \beta)}{2R(\alpha, \beta)S(\alpha, \beta)} \right]$ 。

而上述条件不成立时, 脉冲宽度等于  $1/2x_0$ , 即为联合变换功率谱的周期。函数  $I_b(\alpha, \beta)$  可以看成是在  $\alpha$  方向周期为  $1/2x_0$  的理想周期函数, 而与  $\beta$  无关; 对  $I_b(\alpha, \beta)$  进行指数傅里叶级数展开。

$$I_b(\alpha, \beta) = I_b(\alpha) = \sum_{-\infty}^{\infty} K_v \exp(i2v\alpha x_0), \quad \left| \frac{V_T - R^2(\alpha, \beta) - S^2(\alpha, \beta)}{2R(\alpha, \beta)S(\alpha, \beta)} \right| \leq 1 \quad (6)$$

其中  $K_v = 2x_0 \int_{-\frac{1}{4x_0}}^{\frac{1}{4x_0}} I_b(\alpha) \exp(-i2v\alpha x_0) d\alpha$ , 经计算得

$$K_v = \begin{cases} 2x_0 d & v = 0 \\ \frac{1}{\pi v} \sin(2\pi v x_0 d) \exp\{-iv[\Phi_R(\alpha, \beta) - \Phi_S(\alpha, \beta)]\}, & v \neq 0. \end{cases} \quad (7)$$

将它代入(6)式, 得

$$I_b(\alpha, \beta) = 2x_0 d + \sum_{v=1}^{\infty} H_v[R(\alpha, \beta), S(\alpha, \beta)] \cos[2v\alpha x_0 + v\Phi_R(\alpha, \beta) - v\Phi_S(\alpha, \beta)] \quad (8)$$

式中

$$H_v[R(\alpha, \beta), S(\alpha, \beta)] = \frac{2}{\pi v} \sin\left\{v \cos^{-1} \left[ \frac{V_T - R^2(\alpha, \beta) - S^2(\alpha, \beta)}{2R(\alpha, \beta)S(\alpha, \beta)} \right]\right\} \quad (9)$$

从(8)式可以看出, 二值化联合相关的输出是一系列空间载频为  $2x_0$  的各次谐波, 第  $v$  次谐波的频率是  $2vx_0$ 。对应于  $v = 1$ , 非线性系统保留了互相关信号的位相  $[\Phi_S(\alpha, \beta) - \Phi_R(\alpha, \beta)]$ , 仅影响振幅调制, 这正是输出平面上一级相关信号具有很好相关性能的原因。级数展开式中更高级的项不但其强度与一级相关信号的强度比起来相当小, 而且可以通过在输出平面上的空间窄带滤波器去除。

当输入信号和参考信号的傅里叶变换相等, 则可得一级自相关信号的傅里叶分量  $I_{1a}[R(\alpha, \beta)]$ :

$$\begin{aligned} I_{1a}[R(\alpha, \beta)] &= \frac{2}{\pi} \sin\left\{\cos^{-1} \left[ \frac{V_T - 2R^2(\alpha, \beta)}{2R^2(\alpha, \beta)} \right]\right\} \cos(2x_0\alpha) \\ &= \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \left| \frac{V_T - 2R^2(\alpha, \beta)}{2R^2(\alpha, \beta)} \right|^2} \cos(2x_0\alpha) \end{aligned} \quad (10)$$

由于液晶光阀的实际输入输出特性, 可将常规二值化相关变为反转二值化相关, 即阈值法反转: 大于  $V_T$  的强度为 0; 反之为 1。根据傅里叶变换的性质可知, 除原点外, 反转二值化相关与常规二值化相关的傅里叶场能量分布是相同的。

### 3 计算机模拟

为了研究二值化联合变换相关的性能, 采用  $256 \times 256$  点的二维快速傅里叶(FFT)软件进行了模拟。输入图形和参考图形分别是大小  $20 \times 50$  个像素的二值大写 E, 示于图 2。

为了比较, 将线性联合变换与反转二值联合变换的模拟结果示于表 1。二值化的阈值是预先固定的。



Fig. 2 Image used in correlation of computer simulation

Table 1. Autocorrelation results of linear and binarized joint transform correlators

autocorrelation results	$R_0^2$	$R_0^2/SL^2$	FWHM (x, y)
linear correlation	1	3	(5, 4)
inversely binarized correlation	49.3	15.0	(2, 1)

$R_0^2$  是归一化的自相关峰能量,  $R_0^2/SL^2$  是自相关峰能量和最大旁瓣强度之比, FWHM 是自相关峰半宽度, 由峰值能量降到一半的像素决定。从表中可以看出, 二值化的自相关峰能量比线性自相关峰值大大提高, 峰值旁瓣比大大提高, 而自相关峰宽度有所减少。模拟表明, 阈值取在高频成分区(能量低的区域)较好, 而且对于字母 E 阈值存在着最佳值。另外, 由于阈值作用产生的高阶衍射相关项, 与一阶衍射相关项比, 其能量是很低的。

### 4 二值化联合变换的实验研究及结果

实验系统光路图如图 3 所示。系统写入光源采用最大功率为 6 mw 的 He-Ne 激光器, 读

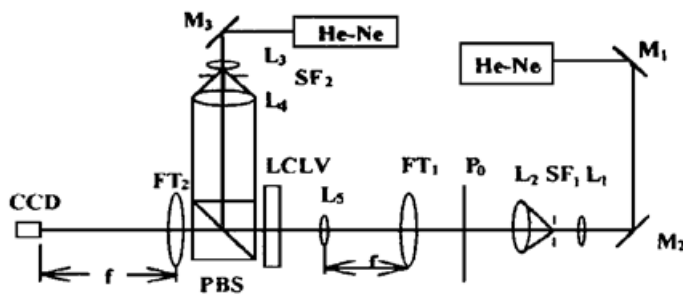


Fig. 3 The experimental setup of NJTC

出光源为最大功率 3 mw 的 He-Ne 激光器,  $M_1M_2M_3$  是全反镜,  $L_1L_3$  和  $L_2L_4$  分别为扩束和准直透镜,  $SF_1, SF_2$  为针孔滤波,  $FT_1, FT_2$  为傅里叶透镜, 焦距为 380 mm。PBS 为偏振分光棱镜, LCLV 为光寻址液晶光阀。光阀用函数发生器作为驱动电源。显微透镜  $L_5$  的采用是考虑到光阀的分辨率。输入平面  $p_0$  上并置输入图像和参考图像, 经过  $FT_1$  的傅里叶变换, 光阀记录下干涉谱的强度, 并经过器件

进行非线性操作, 读出光路将非线性处理后的干涉谱强度读出。并经过  $FT_2$  的傅里叶变换, 在输出平面( $FT_2$  的后焦面)得到相关结果, 并用 CCD 摄入, 在监视器上显示。

实验采用自行研制的 45°扭曲水平定向向列型液晶光阀<sup>[8]</sup>, 其响应时间平均 25 ms, 有效面积为 50 mm × 50 mm, 分辨率 50 lp/mm。液晶光阀采用方波驱动。该液晶光阀的输入输出曲线可以通过调节驱动频率、驱动电压及入射偏振光的偏振面与液晶定向方向的夹角  $\alpha$  得到。保持液晶光阀写入能量和读出能量不变, 选取适当  $\alpha$

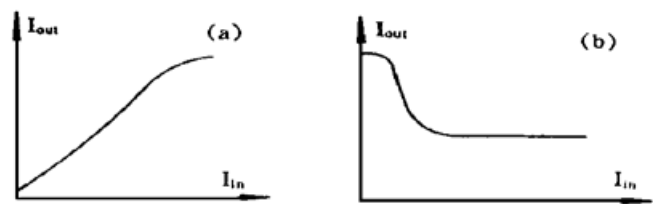


Fig. 4 The output characteristic of LCLV

(a) Applied voltage is 4 volt, (b) Applied voltage is 10 volt

角度, 工作频率及电压, 可获得如图 4 所示的不同输入输出特性曲线。图 4(a) 的输入输出曲线段称为正态, 光阀通常都是利用这段工作的(电压为 4 V 左右); 当加大工作电压(10 V 左右), 光阀工作在如图 4(b) 的曲线段, 称为反转态, 此时相关结果得到很大的改善。这是因为工作电压加大到 10 V 左右, 光阀趋于饱和状态, 而且功率谱的动态范围较大, 低频高能量像素使得降落在液晶层的电压超过一定值而趋于饱和, 使功率谱的高能量像素的值跌入饱和区。所以此时的输入输出特性极其类似二值化阈值特性。实验中正是利用这段来实现二值化

联合变换相关。

输入采用黑背景, 亮图像的二值图像胶片。输入图像和参考图像是两个大小 0.5 cm, 间距为 1 cm 的大写字母 E。适当地调整电压及频率, 使得相关结果最佳。图 5(a) 给出了反转二值化功率谱的照片。为了比较, 正态调制的功率谱同时示于图 5(b)。图 6 和 7 给出了二值化相关实验结果。

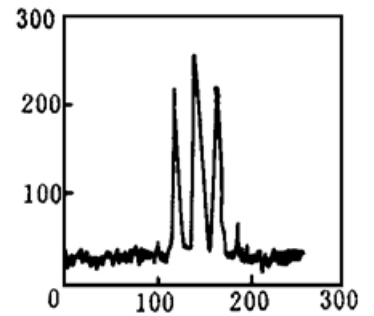
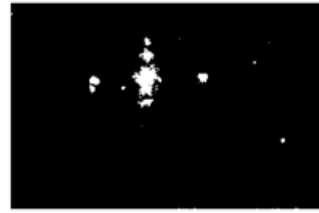
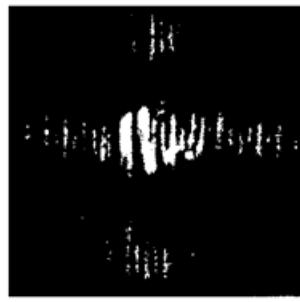
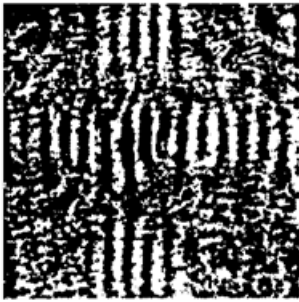


Fig. 5 The joint transform spectrum (JPS) modulated by

LCLV

(a) inversely binarized JPS, (b) linearly JPS

Fig. 6 The experimental

result of binaried

correlation

Fig. 7 The 1-D curve of the

correlated result of

Fig. 6

从图 7 可以看出较明显的二级相关峰, 一级相关峰较二级以上相关峰大得多。这也证实了前面非线性调制理论分析的正确性。去除均匀背景噪声(系统杂散光), 一级相关峰的半宽是(1, 2), 峰值旁瓣比约为 13.3, 和计算机模拟的结果接近。所选取的光阀反转工作段可以近似看成是二值化调制。工作在图 4(a) 的正态曲线段, 改变频率可以达到近似  $k$  阶律非线性调制, 但是与反转二值化相比, 相关结果的改善是有限的。模拟结果和实验结果的差别主要是因为光阀工作特性并非完全的二值化曲线。由于功率谱的动态范围较大, 而且被反转工作曲线灰度调制的像素占总像素很少部分, 绝大部分像素跌入光阀的饱和区, 所以光阀反转特性曲线相对于理想二值化的偏离对相关结果的影响不大。液晶光阀二值化调制的一个优点, 就是阈值的设置可以通过适当地调节工作电压来实现, 不同的识别目标有不同的最佳阈值。另外阈值总是处于能量小的区域, 即高频区, 阈值电压只需在 10 V 左右稍稍调整。

**结 论** 通过调节液晶光阀入射偏振光的偏振面与液晶表面定向轴的夹角, 工作频率以及电压, 利用光阀的饱和性质, 使得光阀工作在反转二值化非线性调制状态, 从而对联合变换功率进行光能准二值调制。实验表明, 该方法可以使得联合变换系统的相关性能得到很大提高。系统实现简单, 方便, 无需电子阈值系统, 为全光调制, 易于操作。液晶光阀的输入输出特性明显依赖于工作状态, 随着工作状态的调整可以非常方便地实现其它不规则形状的非线性调制。进一步的研究工作正在进行之中。

### 参 考 文 献

- [1] B. Javidi, Nonlinear joint power spectrum based optical correlation. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12) : 2358 ~ 2367
- [2] B. Javidi, Nonlinear joint transform correlator based optical pattern recognition using liquid crystal light valves. *Proc. SPIE*, 1992, **1665** : 307~ 314
- [3] B. Javidi, Chung-jung Kuo, Joint transform image correlation using a binary spatial light modulator at the Fourier plane. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(4) : 663~ 665
- [4] B. Javidi, Joseph L. Horner, Single spatial modulator joint transform correlator. *Appl. Opt.*, 1989, **28** (5) : 1027~ 1032
- [5] B. Javidi, Jun Wang, Binary nonlinear joint transform correlation with median and subset median

thresholding. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(8) : 967~ 976

- [6] B. Javidi, Performance of the binary nonlinear joint transform correlator in the presence of the Fourier plane quantization. *Opt. Commun.*, 1991, **80**(3/4) : 275~ 283
- [7] B. Javidi, Qing Tang, Don Gregory, Experiments on nonlinear joint transform correlators using an optically addressed SLM in the Fourier plane. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(14) : 1772~ 1776
- [8] 李海峰, 顾培夫, 刘旭, CdS-CdSe 液晶光阀光电特性分析. *光学学报*, 1996, **16**(7) : 1006~ 1009

## Binary Joint Transform Correlator Using LCLV

Wang Bin    Yu Feihong    Liu Xu    Gu Peifu    Tang Jinfa

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Optical Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

(Received 20 January 1996; revised 15 April 1996)

**Abstract** Compared with the classic correlator, the binary joint transform correlator provides significantly higher peak intensity, larger peak to sidelobe ratio and narrower correlation width. Taking advantage of the saturation property of liquid crystal light valve (LCLV), we can obtain the inversed binary joint transform correlator. The experimental result is very satisfied. The all-optical system is simple and easily operated.

**Key words** joint transform correlation recognition, binary joint transform correlator, joint power spectrum, liquid crystal light valve.