第 24 卷　第 9 期
1997 年 9 月

中　国　激　光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol. A24, No. 9
September, 1997

实时非线性光学联合变换相关器*

秦玉文　葛宝臻**　陈希明**　张以谟**　简水生

(北方交通大学光波技术研究所　北京 100044　**天津大学现代光学仪器研究所　天津 300072)

提要　提出了利用国产液晶光阀(LCLV),使其工作于高对比度状态,实现实时非线性联合变换相关。通过光在液晶盒中传输特性的分析,阐明了 LCLV 的非线性调制原理,并通过计算机模拟和光学实验结果的比较证明用高对比度 LCLV 可以实现实时非线性联合变换相关。

关键词　光学模式识别,实时联合变换相关器,液晶光阀

1　引　言

联合变换相关[1]是光学模式识别、跟踪中近年来最为活跃的一个研究领域,这是因为在用联合变换相关技术对目标进行识别处理的过程中,参考图像与目标图像同时输入光学系统,用参考图像与目标图像进行匹配,不需要制作专门的滤波器,目标图像和参考图像均可以作到实时更新[2]。因此利用联合变换相关技术有利于对目标图像的实时识别处理。目前已提出许多实现联合变换相关的方法和对联合功率谱进行处理的方法[3~5],但由于受到实际器件功能的限制,对于许多实时应用领域而言,可能只有在联合功率谱面上采用高对比度空间光调制器接收联合功率谱并完成非线性处理,或者是在联合功率谱面上采用 CCD 接收并用高速非线性网络进行处理才是可行的方案。本文提出利用国产液晶光阀(LCLV),使其工作于高对比度状态,完成对联合功率谱的非线性处理,实现实时非线性联合变换相关。并从液晶盒这一简单模型出发,完成了光在 LCLV 中传输特性的分析,给出了与 LCLV 对应的光强透射率 T 和相位变化 δ 的表达式,阐明了 LCLV 实现非线性调制的原理。通过计算机非线性联合变换相关模拟结果和光学联合变换相关实验结果的比较,证明了用高对比度 LCLV 可以实现实时非线性联合变换相关。本文主要说明实时非线性联合变换相关的物理机制并给出实验结果,关于所用光电接口器件以及如何实现实时控制,可以参考文献[6]。

2　液晶光阀调制原理

实验中所用 LCLV 为交流反射式,如图 1 所示。LCLV 两定向层之间的夹角为 45°,液晶层的厚度为 6 μm,读出光在液晶层中经过两次,相当于穿过厚度为 12 μm 的液晶层。为分析方

* 863 计划、国家自然科学基金(69392402)和光电子信息工程开放实验室的资助课题。
本文主要工作在天津大学完成。
收稿日期: 1996—08—07; 收到修改稿日期: 1996—10—28

便,在此以透射式液晶盒为例,对 LCLV 的工作原理作理论分析。

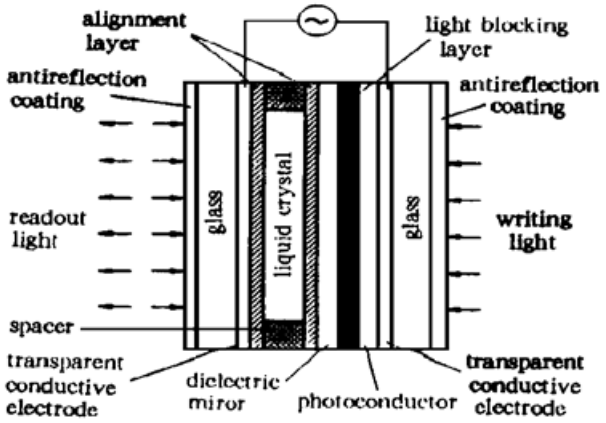

图 1 交流反射式 LCLV 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the alternative reflective LCLV

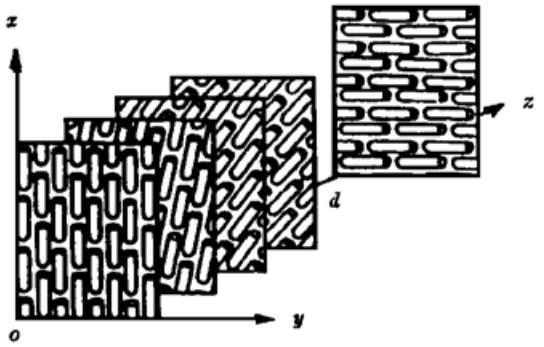

图 2 扭曲向列液晶分子排列示意图

Fig. 2 Molecules diagram of the twisted nematic liquid crystal material

2.1 扭曲向列液晶中光的传输理论

扭曲向列液晶是光学各向异性介质,在一个小的薄层内可以作为光学单轴晶体,其光轴平行于液晶分子的排列方向,因而液晶的光轴方向是随分子排列方向的逐渐改变而变化的,如图 2 所示。在垂直于 z 轴方向上每一薄层内,液晶分子的光学性质与单轴晶体一样,当不加电压时,它的琼斯矩阵可以写为光折射率 n_o 和 n_e 以及分子取向的函数,整个液晶层的琼斯矩阵为各微小薄层琼斯矩阵的乘积。对于厚度为 d,扭曲 90° 且在 $z = 0$ 处分子取向与 x 轴平行的液晶层,琼斯矩阵可以写为[7]

$$J = \exp(-i\Phi)\begin{bmatrix} (\pi/2\gamma)\sin(\gamma) & \cos(\gamma) + i(\beta/\gamma)\sin(\gamma) \\ -\cos(\gamma) + i(\beta/\gamma)\sin(\gamma) & (\pi/2\gamma)\sin(\gamma) \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中 $\beta = \pi d(n_e - n_o)/\lambda$, $\Phi = \pi d(n_e + n_o)/\lambda$, $\gamma = [(\pi/2)^2 + \beta^2]^{1/2}$。当沿 z 轴方向给液晶层加上电场时,液晶分子在电场的作用下,以 θ 角向电场方向倾斜,倾角 θ 是外加有效电压 V_{eff} 的函数,可以表示为

$$\theta = \begin{cases} 0 & V_{\mathrm{eff}} \leqslant V_c \\ \pi/2 - 2\tan^{-1}\{\exp[-(V_{\mathrm{eff}} - V_c)/V_o]\} & V_{\mathrm{eff}} > V_c \end{cases} \tag{2}$$

其中,V_c 为阈值电压,V_o 是一个电压常数。分子倾斜的结果是,相关的折射率变为 n_o 和 $n_e(\theta)$,其中 $n_e(\theta)$ 由下式决定

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2\theta}{n_e^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_o^2} \tag{3}$$

因此,当有外加电压时,琼斯矩阵乃由(1) 式表示,但 β 和 Φ 表示式中的 n_e 要换为 $n_e(\theta)$。

除了一个不重要的相位常数 $\exp(-i\Phi)$ 以外,琼斯矩阵仅是单变量 β 的函数。对于某一给定的 LCLV,相位参数 β 的大小由外加有效电压 V_{eff} 决定,因此可以认为相位参数 β 是外加有效电压 V_{eff} 的一种换算形式。

2.2 LCLV 非线性调制原理

实验中所用交流反射式 LCLV,用偏振分束棱镜给出所需要的光学信息,相当于起偏器与检偏器垂直放置,读出面上液晶分子排列方向与检偏器的检偏方向成 0°或 90°角,这种结构与

透射式液晶盒中 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0°$ 或 $\varphi_1 = \varphi_2 = 90°$ 对应(φ_1 和 φ_2 分别表示起偏器和检偏器与 x 轴的夹角), 即起偏器与检偏器平行且平行于 x 轴或 y 轴。对于这种结构, 光强透射率 T 和相位变化 δ 可以分别写为

$$T_{0,0} = T_{90,90} = (\pi/2\gamma)^2 \sin^2(\gamma) \tag{4}$$

$$\delta_{0,0} = \delta_{90,90} = \beta \pm m\pi,\ m = 0, 1, \cdots \tag{5}$$

其中, m 的取值范围为: 当 $\sin(\gamma) > 0$ 时为偶数, 当 $\sin(\gamma) < 0$ 时为奇数。

实验中我们感兴趣的主要是强度调制, 把 $d = 12\ \mu m$, $\lambda = 632.8$ nm, $n_o = 1.4519$, $n_e = 1.6017$(LCLV 的折射率参数由上海光学仪器研究所提供), $V_o = 0.76$ V, $V_c = 0.98$ V[7] 代入有关表达式, 求得光强透射率 T 随 β 与 V_{eff} 的变化曲线分别绘于图 3(a) 和(b) 中。

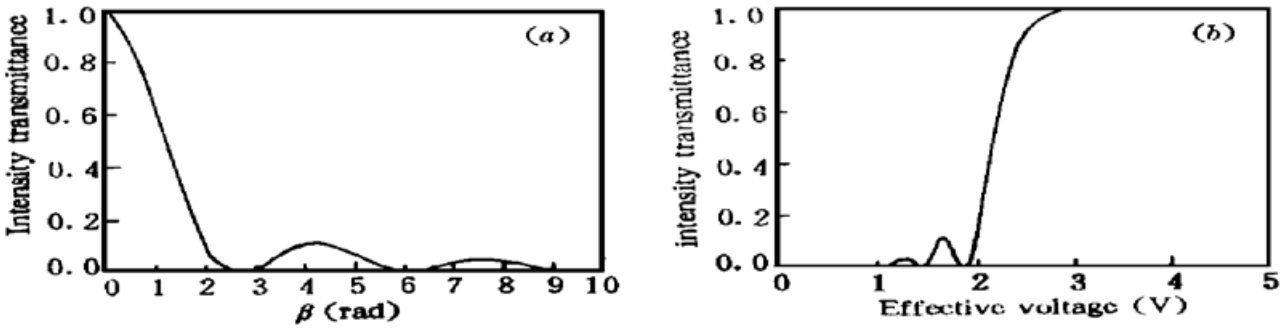

图 3　$\varphi_1 = \varphi_2 = 0°$ 或者 $\varphi_1 = \varphi_2 = 90°$ 时, 光强透射率 T 随相位参数 β 与外加有效电压 V_{eff} 的变化曲线($d = 12\ \mu m$)

Fig. 3　Transmissive light intensity T versus β and V_{eff}($d = 12\ \mu m$), when $\varphi_1 = \varphi_2 = 0°$ or $\varphi_1 = \varphi_2 = 90°$

交流反射式 LCLV 依靠其写入面上的光敏异质结(光导层与光阻挡层界面) 实现调制, 当写入光照射到光敏异质结上时, 光敏异质结的电导率发生变化, 产生一个与输入图像对应的阻抗分布, 因而在液晶层上就有一个与输入图像对应的电压分布, 加在液晶层上的电压决定其光学特性。图 4 给出了 LCLV 的实测光强输入输出特性, 与图 3 按有效电压算出的结果基本一致。

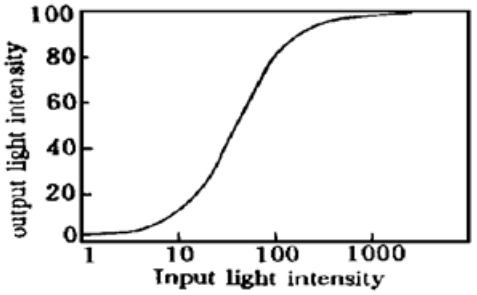

图 4　LCLV 的光强输入输出特性曲线

Fig. 4　Output light intensity of the LCLV versus input light intensity

从实验特性曲线可以看出, 当输入光强达一定值时, 输出光强不再随输入光强的增加而变化, 输入输出光强曲线的这一饱和特性, 是 LCLV 实现非线性调制的基础。当输入信号光强度变化范围较大(相当于有效电压变化较大) 时, 对于光强度变化的一维信号, LCLV 把振幅调制的干涉强度信号变为脉冲宽度调制的相干光读出信号。

3　非线性联合变换相关及其实验结果

非线性联合变换相关系统如图 5 所示。通过选择施加在 LCLV2 上的工作电压和频率, 可以使其工作于高对比度状态。LCLV2 按照自身的特性对联合功率谱进行非线性阈值化处理, 阈值化的非线性联合功率谱可以看作是如图 6 所示的非线性网络或非线性器件的输出信号,

其非线性特性可以表示为[8]

$$g(E)=\begin{cases}E^{k}, & E\geqslant 0,\\ -|E|^{k}, & E<0,\end{cases}\quad k\leqslant 1 \tag{6}$$

其中 E 表示联合功率谱强度, k 表示网络或器件的非线性程度。

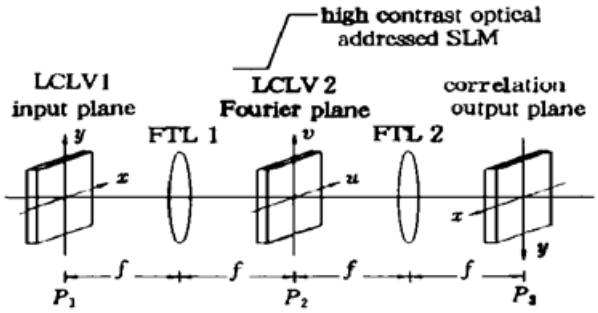

图 5 在傅里叶平面上利用高对比度 LCLV 而实现的非线性联合变换相关器

Fig. 5 Nonlinear joint transform correlator realized by using high contrast LCLV on the Fourier plane

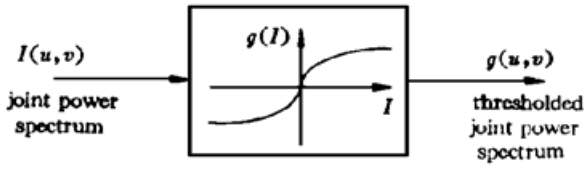

图 6 k 阶律非线性阈值网络或非线性阈值器件

Fig. 6 k-th law nonlinear thresholding network or device

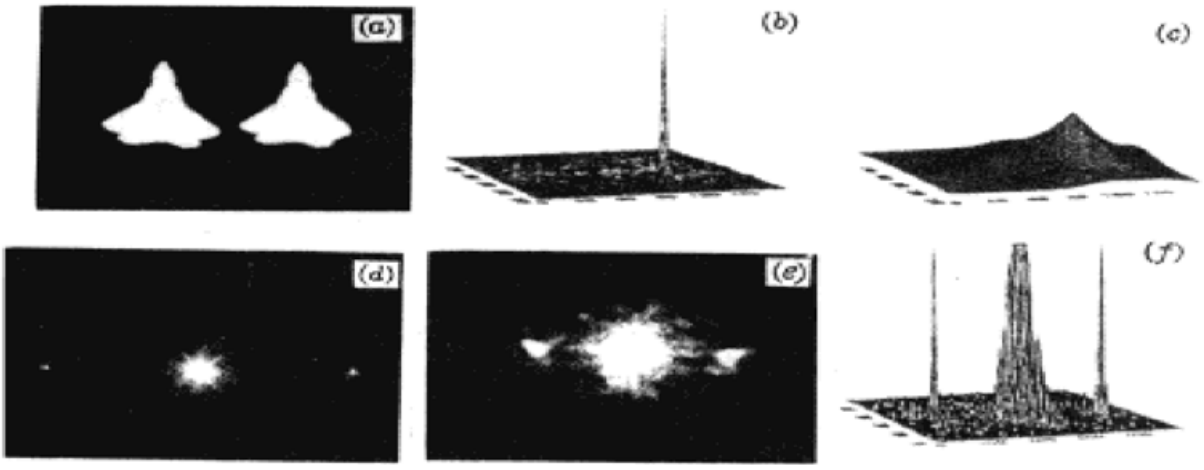

图 7 自相关模拟和实验结果((a) ~ (f) 的说明见正文)

Fig. 7 Simulation and experimental results of autocorrelation

(a) The input reference and object images; (b) Computer simulation result of the nonlinear joint transform correlation ($k=0$); (c) Computer simulation result of the linear joint transform correlation ($k=1$); (d) Optical experimental result of the nonlinear joint transform correlation; (e) Optical experimental result of the nearly linear joint transform correlation; (f) Optical experimental result of the nonlinear joint transform correlation expressed by 3-D plotting

当 $k=1$ 时, 非线性网络或非线性器件的输出与输入完全相同, 为线性处理, 仅把强度分布变换为振幅分布。当 $k=0$ 时, 输出相应于硬剪切非线性(hard clipping nonlinearity), 如果输入为一维周期函数, 则非线性网络或非线性器件把强度变化的一维信号变换为脉冲宽度变化的一维信号, 此时非线性联合变换相关器的自相关输出可以表示为[8]

$$g_{1a}[R(u,v)]=\begin{cases}\dfrac{2\sqrt{V_T}}{\pi R(u,v)}\sqrt{1-\dfrac{V_T}{4R^2(u,v)}}\cos(4\pi u x_0), & 4R^2(u,v)\geqslant V_T\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

其中 $R(u,v)$ 是参考图像傅里叶变换的振幅频谱, V_T 为阈值, $2x_0$ 是在输入平面上参考图像与目标图像之间的距离, (u,v) 是傅里叶平面上的空间频率坐标。

图 7 为自相关模拟与实验结果。其中, 图 7 (a) 给出了在计算机模拟计算和光学实验研究中所用输入参考与目标图像, 图 7(b) 给出了非线性联合变换相关计算机模拟结果($k=0$, 在 512 × 512 个数据中取 170 ~ 340 行, 0 ~ 190 列), 作为比较在图 7(c) 中给出了线性联合变换相关计算机模拟结果($k=1$, 在 512 × 512 个数据中取 170 ~ 340 行, 0 ~ 190 列), 图 7(d) 为非线性联合变换相关光学实验结果, 图 7(e) 为 LCLV2 工作状态接近于线性条件下得到的近线 性联合变换相关光学实验结果, 图 7(f) 为用三维绘图表示的与图 7(d) 对应的非线性联合变换相关光学实验结果。当目标与参考图像同为卡车、坦克、小汽车等其他目标图像时, 获得的实验结果与图 7 给出的结果完全相似。比较图 7 给出的光学实验结果和计算机模拟结果, 可以明显看出, 由非线性联合变换相关系统获得的实验结果是非线性联合变换相关的结果。

致谢　感谢上海光学仪器研究所提供了实验中使用的液晶光阀。感谢上海光学仪器研究所裘颖刚教授和中国科学院西安光机所李育林教授在研究工作中给予许多有益帮助。

参　考　文　献

1 C. S. Weawer, J. W. Goodman. A technique for optically convolving two functions. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(7) : 1248~1249

2 F. T. S. Yu, X. J. Lu. A real-time programmable joint transform correlator. *Opt. Commun.*, 1984, **52**(1) : 10

3 B. Javidi, C. J. Kou. Joint transform image correlation using a binary spatial light modulator at the Fourier plane. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(4) : 663~ 665

4 J. Khoury, J. S. Kane, G. Asimellis *et al.*. All-optical nonlinear joint Fourier transform correlator. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(35) : 8216~ 8225

5 H. Inbar, D. Mendlovic, E. Marom. Erro-diffusion binarization for joint transform correlators. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(5) : 707~ 714

6 自适应运动目标跟踪系统及其性能研究. 天津大学学报, 待发表

7 K. Lu, B. E. A. Saleh. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(3) : 240~ 246

8 B. Javidi. Nonlinear joint power spectrum based optical correlation. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(1) : 2358~ 2367

Real-time Nonlinear Joint Transform Correlator

Qin Yuwen　Ge Baozhen*　Chen Ximing*　Zhang Yimo*　Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044

* Institute of Optoelectronic and Precision Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract　Utilizing a liquid crystal light valve (LCLV), which is produced in China and is made to work in high contrast state, to realize nonlinear joint transform correlation is proposed in this paper. The nonlinear modulation principle of the LCLV has been explained by analyzing the light propagation property in the liquid crystal box. The idea of using high contrast LCLV to realize nonlinear joint transform correlation is confirmed by comparing the computer simulation results with the optical experimental results.

Key words　optical pattern recognition, real-time joint transform correlator, liquid crystal valve