

基于多焦点全息透镜变换的实时高效 非线性联合变换相关器

王红霞 李晓建 何俊发 刘长文

(第二炮兵工程学院物理室, 陕西, 西安, 710025)

摘要 提出一种实时高效非线性联合变换相关器,用多焦点全息透镜产生联合变换功率谱阵列,有效地利用了空间光调制器的使用面积和读出光能量,液晶光阀工作在近饱和区实时实现非线性相关,理论分析和实验结果表明,这种相关器将多个锐化的相关信号叠加在一起,可输出增强的相关信号。

关键词 联合变换相关器,全息透镜,液晶光阀,非线性变换。

REAL-TIME HIGH EFFICIENCY NONLINEAR JOINT TRANSFORM CORRELATOR BASED ON MULTI-FOCUS HOLOLENS CONVERSION

WANG Hong-Xia LI Xiao-Jian HE Jun-Fa LIU Chang-Wen

(Department of Physics, Second Artillery Engineering College, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract A real-time high efficiency nonlinear joint transform correlator was proposed. In this correlator, a multi-focus hololens was used to produce joint power spectral array so that the areas of the liquid crystal light valve (LCLV) and the output light energy can be used effectively. The LCLV worked in near-saturated state in order to realize nonlinear joint transform correlation. The theoretical analysis and experimental results verified that the optical correlation signal can be enhanced by this correlator.

Key words joint transform correlator, hololens, liquid crystal light valve, nonlinear transform.

引言

联合变换相关(JTC)是实现光学图像识别的主要方法之一,具有结构紧凑、不需制备匹配滤波器和精确复位,容易实现实时性等特点,引起人们的关注。传统的联合变换相关器,相关识别能力较低,为此人们提出了一些改进方法。其中,非线性联合变换相关器,通过对功率谱进行二值化等操作,使其识别能力有较大的提高。功率谱二值化的非线性操作实际上是将振幅调制的功率转化为二值脉冲调制的功率谱,锐化了相关信号,但使其高频成份损失较多,相关峰强度不够高。本文提出基于全息透镜变换的实时高效非线性联合变换相关器,该相关器用多焦点全息透镜形成功率谱阵列,此阵列经液晶光阀(LCLV)近似二值化非线性转换后,再经过付氏透镜作一次逆变换,在后焦面上得到相关输出。功率谱

阵列充分利用了LCLV的有效使用面积,使读出光场中出现多组功率谱信号,读出光能量得以充分利用,相关信号强度得到增强。

1 原理及分析

实验所用液晶光阀是一平方律探测器,它不仅可以作为联合变换功率谱的实时显示器件,而且可以方便地通过增加LCLV的工作电压和频率,使其工作在近饱和状况,近似得到功率谱的二值化非线性调制。实验发现,经LCLV非线性调制的相关器其相关信号不够强,我们利用多焦点全息透镜改善了相关信号的性能。

多焦点全息透镜能将输入图像波前通过衍射变换成一组波前,形成该图像的多重象和多重谱,在实验室中,可以通过拍摄多点源全息图,使各物点同时与参考光干涉形成多焦点全息透镜。图1为拍摄

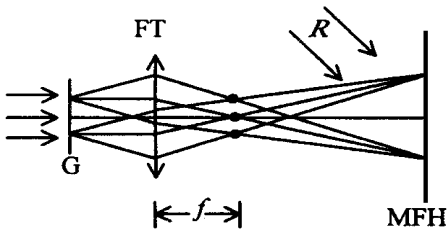


图1 全息透镜记录光路

Fig.1 Optical path of recording MFH

多焦点全息透镜(MFH)的光路,用平行光照射相位光栅G,经过透镜FT在后焦面上形成离散的谱点阵,用全息干板将谱点阵和一平行参考光的相干叠加记录下来,即可方便地得到多焦点全息透镜.拍摄时,用一带小孔的不透光黑纸置于FT焦面上,挡掉杂光,只让有限个谱点通过,将这样得到的全息透镜引入光学相关器中,可以产生联合变换的多重谱,得到增强的相关信号.分析如下:

由图1所示,设在FT焦面上,坐标为 (x_{oi}, y_{oi}, z_o) 的各谱点在干板记录面上的复振幅为:

$$O(x, y) = \sum_i O_{oi}(x, y) \exp[j\mathcal{Q}_i(x, y)], \quad (1)$$

用斜入射的平行参考光R(与z轴成 θ 角)线性记录,全息图的复振幅透射系数为:

$$t = (R_o^2 + \sum_i O_{oi}^2) + \sum_i \sum_n O_{oi} O_{on} \exp[j(\mathcal{Q}_i - \mathcal{Q}_n)] + \sum_i O_{oi} R_a \exp[j(\mathcal{Q}_i + kx \sin\theta)] + \sum_i O_{oi} R_a \exp[-j(\mathcal{Q}_i + kx \sin\theta)], \quad (2)$$

式(2)中,第1项为自相干项,第2项为各谱点的互相干项,该项可以通过适当增加参物光光强比及夹角得到抑制,第3和第4项为全息透镜所需要的干涉项.由图2可知:

$$\mathcal{Q}_i = k\{[(x - x_{oi})^2 + (y - y_{oi})^2 + z_o^2]^{\frac{1}{2}} - (x_{oi}^2 + (y_{oi}^2 + z_o^2))^{\frac{1}{2}}\}, \quad (3)$$

因 $z_o \gg x_{oi}, z_o \gg y_{oi}$,在菲涅耳近似条件下,将上式对 z_o 展开得:

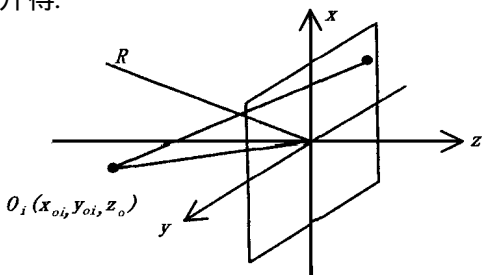


图2 全息透镜原理分析图

$$\mathcal{Q}_i = k \frac{1}{2z_o} [x^2 + y^2 - 2(x x_{oi} + y y_{oi})], \quad (4)$$

忽略各谱点的互相干项,式(2)变为:

$$t = C_o + \sum_i C_i \exp\left\{-j\left[k \frac{x^2 + y^2}{2z_o}\right] - k\left(\frac{x_{oi}}{z_o} - \sin\theta\right)x - k\frac{y_{oi}}{z_o}y\right\} + \sum_i C_i \exp\left\{j\left[k \frac{x^2 + y^2}{2z_o}\right] - k\left(\frac{x_{oi}}{z_o} - \sin\theta\right)x - k\frac{y_{oi}}{z_o}y\right\}, \quad (5)$$

式(5)第2项的相位函数中,包含有负值二次位相因子,因而全息透镜具有完成傅里叶变换的功能,该项的各求和子项相当于焦距为 $f = z_o$ 的正透镜和光束转向器的组合作用;第3项的各求和子项等效于焦距相等的负透镜的光束转向器的组合作用.傅里叶变换是由正透镜完成的,下面的分析仅考虑第2项的作用.

图3为用多焦点全息透镜实现联合变换相关的原理图,设在联合变换相关器中,目标图像和参考图像紧靠全息透镜对称放置,在x方向中心相距为2b,用记录全息透镜的共轭参考光 R^* 照射,则在全息透镜的入射面上光场分布为:

$$u = [r(x - b, y) + t(x + b, y)] \exp(jk \sin\theta), \quad (6)$$

紧靠全息透镜之后的平面上光场为:

$$u = u(x, y) \sum_i C_i \exp\left\{-j\left[k \frac{x^2 + y^2}{2z_o}\right] - k\left(\frac{x_{oi}}{z_o} - \sin\theta\right)x - k\frac{y_{oi}}{z_o}y\right\} = [r(x - b, y) + t(x + b, y)] \cdot \sum_i C_i \exp(-jk \frac{x^2 + y^2}{2z_o}) \exp[jk(\frac{x_{oi}}{z_o}x - \frac{y_{oi}}{z_o}y)], \quad (7)$$

根据菲涅耳衍射公式,上述光场到达全息透镜后的焦面上时的光场:

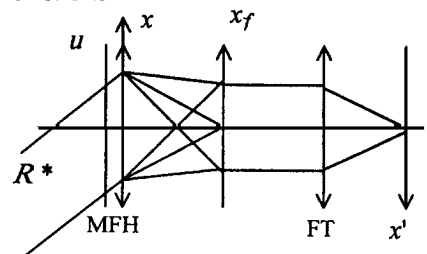


图3 用多焦点全息透镜实现联合变换相关

$$\begin{aligned}
 U_f(x_f, y_f) &= \frac{1}{j\mathcal{N}} \exp\left[j \frac{k}{2z_o}(x_f^2 + y_f^2)\right] \times \\
 & FT \left\{ u(x, y) \exp\left[j \frac{k}{2z_o}(x^2 + y^2)\right] \right\} \\
 &= \frac{1}{j\mathcal{N}} \exp\left[j \frac{k}{2z_o}(x_f^2 + y_f^2)\right] \cdot \\
 & [R(\xi, \eta) \exp(-j2\pi\xi b) + \\
 & T(\xi, \eta) \exp(j2\pi\xi b)] * \\
 & \sum_i C_i \delta\left(\xi - \frac{x_{oi}}{\lambda z_o}, \eta - \frac{y_{oi}}{\lambda z_o}\right), \quad (8)
 \end{aligned}$$

功率谱阵列为:

$$\begin{aligned}
 |U_f(x_f, y_f)|^2 &= [|R|^2 + |T|^2 + RT^* \exp(-j4\pi\xi b) \\
 &+ R^* T \exp(j4\pi\xi b)] * \sum_i C_i \delta\left(\xi - \frac{x_{oi}}{\lambda z_o}, \eta - \frac{y_{oi}}{\lambda z_o}\right), \quad (9)
 \end{aligned}$$

式(9)略去了常量系数,此功率谱阵列被 LCLV 实时记录,由读出光读出后,再经过傅氏透镜 FT(焦距与 MFH 焦距相同)作一次付氏逆变换,在后焦面上得到相关信号:

$$\begin{aligned}
 V(x, y) &= FT^{-1} \left\{ |U_f(x_f, y_f)|^2 \right\} = \\
 & [r(x, y) \odot r(x, y) + t(x, y) \odot \\
 & t(x, y) + r(x, y) \odot t(x, y) * \\
 & \delta(x - 2b, y) + t(x, y) \otimes r(x, y) * \\
 & \delta(x + 2b, y)] \cdot \sum_i C_i \\
 & \exp(j2\pi \frac{x_{oi}}{\mathcal{N}} x + \frac{y_{oi}}{\mathcal{N}} y), \quad (10)
 \end{aligned}$$

两个对称的互相关信号强度为:

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= [r \odot t^* \delta(x - 2b, y) + t \odot r^* \\
 & \delta(x + 2b, y)]^2 \cdot \left| \sum_i C_i \exp(j2\pi \frac{x_{oi}}{\mathcal{N}} x + \frac{y_{oi}}{\mathcal{N}} y) \right|^2, \quad (11)
 \end{aligned}$$

相关信号强度因子为 $\left| \sum_i C_i \exp(j2\pi \frac{x_{oi}}{\mathcal{N}} x + \frac{y_{oi}}{\mathcal{N}} y) \right|^2$, 这是多个高频余弦调制函数的组合,调制的结果使相关信号等效强度明显增加。

2 实验结果

图 4 为用多焦点全息透镜产生功率谱阵列的实时高效非线性联合变换相关器(HNJTC)结构图。参考图像和目标图像并排位于输入面 P_1 上,经全息透镜 MFH 变换后在 LCLV 的输入面上形成功率谱点阵,读出光经 BS_2 将功率谱信号读出后,再经付氏透镜 FT 作一次逆变换,在后焦面上得到多组叠加在一起增强的相关信号,实验所用 LCLV 为上海光学仪器研究所生产,通过调节其工作频率和电压($\nu = 4.6\text{kHz}$, $V = 6.3\text{V}$)使工作在近饱和区内,实现对

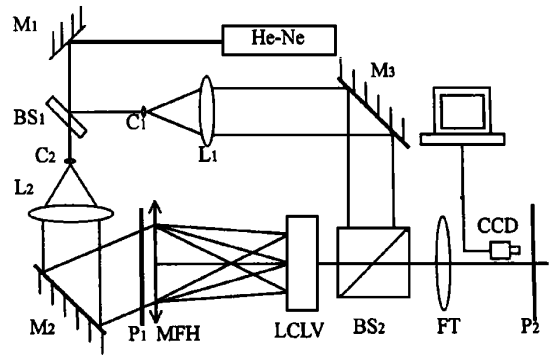


图 4 实时高效非线性联合变换相关器结构

Fig. 4 Schematic diagram of HNJTC

功率谱的近似二值化的非线性变换,达到锐化相关信号的目的。

我们采用图 1 光路拍摄了 2×2 个焦点分布的全息透镜(见图 5),记录材料用的是天津 1 型干板,用两个一维正交放置的全息位相光栅产生二维谱点阵,为了抑制噪声,通过多次拍摄,当参物光强近似为 4:1 时,有些噪声得到了很好的抑制。为了提高衍射效率,用氯化银漂白液将干板作了漂白处理,总的衍射效率大于 20%,用制作的全息透镜对文字图像进行了相关识别实验,CCD 拍摄的实验结果如图 6 所示。为了比较采用全息透镜产生功率谱阵列的高效非线性相关器的输出相关性能,分别测试了相关信号的峰值强度 I 、半峰值宽度 FWHM,并与经典实时相关器输出性能作了比较(见表 1)。

从上述实验结果可见,本文提出的联合变换相关器的输出结果好于经典的联合变换相关器。4 焦点全息透镜的相关系统输出信号峰值强度及锐度增

表 1 相关信号性能参数

Table 1 Performance parameter of correlation results		
JTC	I	FWHM
全息透镜	216	3×2
经典相关	184	8×6



图 5 全息透镜焦点分布

Fig. 5 Focus array of hologram

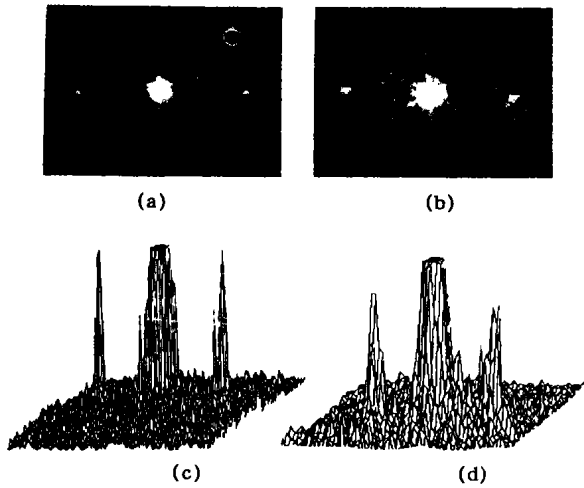


图6 实验结果

(a) 4焦点全息透镜相关信号 (b) 经典相关输出 (c) a的三维显示 (d) b的三维显示

Fig. 6 Experimental results

- (a) correlation output by HNJT
 (b) correlation output by JTC
 (c) 3D display of (a)
 (d) 3D display of (b)

加明显, 如果用高质量的相位型记录材料制作全息透镜, 相信还会进一步提高相关信号性能.

3 结语

本文提出的实时高效非线性联合变换相关器用多焦点全息透镜产生联合变换功率谱点阵, 通过增大LCLV的工作电压和频率使LCLV工作在近饱和区实现对功率谱点阵的非线性转换, 与经典联合变换相关器相比, 这种相关器充分利用了读出光的能量和LCLV的使用面积, 输出信号峰值强度、锐

化度及信噪比均有不同程度的提高. 通过实验证明了多焦点全息透镜用于联合变换是可行的, 由于全息透镜制作简便, 有望构成一些重量轻、成本低的联合变换相关器. 如果采用一些特殊工艺和高质量的记录材料提高全息透镜的衍射效率和抑制噪声, 将会进一步提高相关信号的性能.

REFERENCES

- [1] Javidi B, Tang Q, Gregory D. Experiments on nonlinear joint transform correlators using an optically addressed SLM in the Fourier plane. *Applied Optics*, 1991, **30**(14): 1772—1776
- [2] Javidi B, Kuo C J. Joint transform image correlation using a binary spatial light modulator at the Fourier plane. *Applied Optics*, 1988, **27**(4): 663—665
- [3] Khoury J, Kane J S, Asimellis G. All-optical nonlinear joint Fourier transform correlator. *Applied Optics*, 1993, **32**(5): 707—714
- [4] QIN Yu-Wen, GE Bao-Zhen, CHEN Xin-Ming, et al. Real-time nonlinear joint transform correlator. *Chinese Journal of Lasers* (秦玉文, 葛宝臻, 陈希明, 等. 实时非线性光学联合变换相关器, 中国激光), 1997, **A24**(9): 837—841
- [5] CHEN Peng, HUANG Xian-Lie, LAI Hong-Kai, et al. Multitarget detection using a high-efficiency hybrid optical joint transform correlator. *Applied Laser* (陈棚, 黄献烈, 赖红凯, 等. 高效光电混合的联合变换相关器作多目标检测, 应用激光), 1998, **18**(6): 265—267
- [6] ZHANG Yi-Mo, QIN Yu-Wen, HUANG Zhan-Hu, et al. Real-time high-efficiency joint transform correlator. *Acta Optica Sinica* (张以谟, 秦玉文, 黄战华, 等. 实时高效联合变换相关器, 光学学报), 1995, **15**(7): 883—887
- [7] YU Mei-Wen. *Optical Holography and Its Applications*. Beijing: Beijing Institute of Science and Technology Press (于美文. 光全息学及其应用, 北京: 北京理工大学出版社), 1996: 72—75