

文章编号 : 0253-2239(2002)06-0641-04

利用 Ce:KNSBN 光折变晶体提高光学图像 相关模式识别鉴别率*

郭庆林 傅广生 梁宝来 张金平 魏艳红

(河北大学物理科学与技术学院,保定 071002)

摘要: 给出了在相干匹配滤波系统中利用 Ce:KNSBN 光折变晶体非线性特性实现图像边缘增强光学相关模式识别的理论分析和实验结果。实验中自相关峰半最大值宽度降低了 75%, 自相关峰与互相关峰的强度比增强了近一倍, 自相关峰的边瓣强度和互相关峰的强度得到抑制, 系统的信噪比和相关鉴别率得到显著提高。

关键词: 模式识别; 边缘增强光学相关; 光折变

中图分类号: O799:O438 文献标识码: A

1 引 言

光学相关和光学模式识别是光学信息处理领域的重要研究课题, 尤其是匹配滤波光学相关器在多目标光学识别中具有不可取代的地位^[1-3]。光折变材料由于具有实时处理、易于写入等诸多优点而在匹配滤波光学相关模式识别中得到了广泛的应用^[3-7]。掺杂钾钠铌酸锶钡(KNSBN)晶体是我国率先开发成功的一种性能优异的新型光折变材料, 在光信号放大、自抽运相位共轭、光全息存储等领域具有重要的应用价值。在光全息记录应用中, 全息图的线性再现要求衍射效率 η 随光栅条纹调制度 m 的变化规律满足“平方律”^[8], 但对于 Ce:KNSBN 光折变晶体体全息图, 由于写入光之间的耦合作用使得衍射效率不再遵从“平方律”, 而是具有自己的非线性衍射特性^[9], 衍射效率随光栅条纹调制度的整个变化曲线呈一环状, 最大光栅衍射效率对应 $m = 0.65$, 并非象理想体相位光栅对应 $m = 1$ 。这种非线性变化特性一方面会造成全息再现像的失真, 制约 Ce:KNSBN 晶体在全息存储中的应用; 另一方面, 它又可以用于光学信息处理领域, 实现光学图像的边缘增强操作^[10]。本文将 Ce:KNSBN 光折变晶体置于相干匹配滤波光学信息处理系统的傅里叶频谱平面, 利用晶体的非线性特性, 选择合适的光栅写入光强比, 实现了图像的边缘增强实时光学相关模

式识别, 系统的信噪比和相关鉴别率得到显著提高。

2 实验装置和原理

实验装置如图 1 所示。晶体为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ Ce:KNSBN(山东大学晶体所生长)。偏振分束器 BS 把 Ar^+ 514.5 nm 激光分为两束, 一束由反射镜 M_1 反射作为写入参考光 I_P , 另一束由反射镜 M_2 反射作为写入物光 I_S , I_P 、 I_S 的偏振态和光强由半波片 HWP_1 、 HWP_2 和偏振片 P_1 、 P_2 调节。 L_1 为焦距 $f_1 = 400 \text{ mm}$ 的傅里叶变换透镜, 输入物 IP_1 置于 L_1 前焦平面, 晶体置于 L_1 后焦平面。 I_S 与 I_P 相互作用在晶体内写入输入物 IP_1 的傅里叶变换全息图。在晶体另一侧以 He-Ne 的 632.8 nm 激光作为读出光 I_R , I_R 的偏振态和光强由半波片 HWP_3 和偏振片 P_3 调节。 IP_2 为靶物, L_2 为焦距 $f_2 = 325 \text{ mm}$ 的傅里叶变换透镜, IP_2 和晶体分别居于 L_2 的前后焦平面。系统的输出光 ID 经透镜 L_3 作逆傅里叶变换, 由置于 L_3 后焦面的 CCD 相机接收并送入计算机处理, 其中 L_3 的焦距 $f_3 = 325 \text{ mm}$ 。为了抑制噪声, CCD 相机前放入偏振片 P_4 和滤色片 RF。实验中 I_S 、 I_P 和 I_R 均为 e 偏振光。

设图 1 中输入物函数 IP_1 为 $o(x_1, y_1)$ (x_1, y_1) 为输入平面的坐标, 晶体平面的坐标为 (u, v) , 则 $o(x_1, y_1)$ 的傅里叶变换为:

$$O(u, v) = \iint o(x_1, y_1) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda_{514} f_1} (ux_1 + vy_1)\right] dx_1 dy_1, \quad (1)$$

* 河北省自然科学基金(101059)资助课题。

E-mail: qinglinguo@sina.com

收稿日期 2001-05-28; 收到修改稿日期 2001-08-09

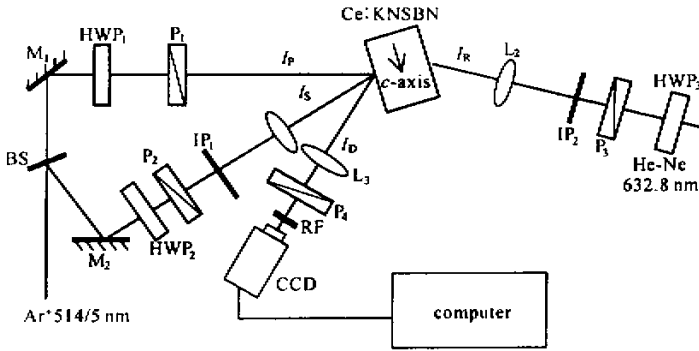


Fig.1 Schematic of experimental setup

参考光波选取强度为 I_p 的平面波,其傅里叶变换为:

$$R(u, v) = R_0 \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda_{514}} u \sin\theta\right]. \quad (2)$$

其中 θ 为参考波矢和 (u, v) 平面法线的夹角。物波 $O(u, v)$ 和参考光波 $R(u, v)$ 相互作用并通过电光效应在晶体中记录输入物 IP_1 的傅里叶变换全息图。在实际中对于多数物体而言,其傅里叶功率谱分布极度不均匀,直流部分的强度非常大,而高频成分的强度要小几个量级^[7],这样导致在晶体中所记录的全息图条纹调制度分布极度不均匀。由文献[9]结果可知,不同调制度对应的光栅衍射效率不同。若选择合适的 I_s/I_p 的值,使得输入物中高空间频率成分对应于光栅条纹调制度为 $m \approx 0.65$,而输入物直流成分对应于光栅条纹调制度为 $m \approx 0$,则当再现晶体记录的全息图时,输入物直流成分相应的衍射效率受到抑制,而输入物边缘所对应的高频分量的衍射效率得到增强,此时晶体相当于一个高通滤波器,其透过率函数可表示为^[10]:

$$t_{ed}(u, v) \propto \gamma O_{ed}(u, v) R^*(u, v), \quad (3)$$

其中下角标“ed”代表边缘增强,“*”表示共轭, $\gamma = 2\pi(\lambda_{633} L n^3 r_{eff})$, L 为晶体的厚度, n 为折射率, r_{eff}

为有效电光系数。假设全息图再现光波为平面波,且为写入参考光的共轭光 R^* (即在图1中取走 L_2 和 IP_2 ,以 I_R 为平面波读出晶体中所记录输入物 IP_1 的傅里叶变换全息图),经晶体滤波后其出射光 I_D 的复光波场分布为:

$$E_{ed}(u, v) = t_{ed}^*(u, v) R^*(u, v), \quad (4)$$

再经过透镜 L_3 作逆傅里叶变换,在 L_3 后焦平面得到系统的输出:

$$g_{ed}(x_3, y_3) = \iint O_{ed}^*(u, v) \times \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda_{633} f_3} (ux_3 + vy_3)\right] dudv, \quad (5)$$

式中 (x_3, y_3) 为 L_3 后焦平面的坐标,当条件 $\lambda_{514} f_1 = \lambda_{633} f_3$ 得到满足时,系统的输出为输入物 $O(x_1, y_1)$ 的边缘增强再现实像:

$$g_{ed}(x_3, y_3) = o_{ed}^*(x_3, y_3). \quad (6)$$

如果读出光路中的透镜 L_2 和靶物 IP_2 不被取走,设靶物平面坐标为 (x_2, y_2) ,选择靶物 IP_2 和已记录输入参考物 IP_1 相同, IP_2 的分布函数为 $o(x_2, y_2)$,当条件 $\lambda_{514} f_1 = \lambda_{633} f_2 = \lambda_{633} f_3$ 得到满足时,系统的输出为:

$$g_{ed}(x_3, y_3) = \iint R(u, v) O_{ed}^*(u, v) O_{ed}(u, v) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda_{633} f_3} (ux_3 + vy_3)\right] dudv, \quad (7)$$

这是输入物的边缘增强自相关。

如果靶物和参考物不同, IP_1 为 $o(x_1, y_1)$ 而 IP_2 为 $o(x_2, y_2) + n(x_2, y_2)$,则系统输出结果包含着自相关和互相关项:

$$g_{ed}(x_3, y_3) = \iint R(u, v) O_{ed}^*(u, v) O_{ed}(u, v) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda_{633} f_3} (ux_3 + vy_3)\right] dudv + \iint R(u, v) O_{ed}^*(u, v) N(u, v) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda_{633} f_3} (ux_3 + vy_3)\right] dudv, \quad (8)$$

其中 $N(u, v)$ 是 $n(x_2, y_2)$ 的傅里叶变换频谱,因

此可以实现输入物的边缘增强相关模式识别检测。

3 实验结果

实验中首先取走图 1 中的 L_2 和 IP_2 ,以 I_R 为平面光波读出晶体中所记录输入物 IP_1 的傅里叶变换全息图 ,实现对输入光学图像的边缘增强再现。以图 χ_a)中字母“ C ”的二值化图像(采用高反差 135 型黑白胶片制成)作为系统的输入物 IP_1 ,调整光栅写入光强比为 $I_s/I_p = 0.01$,得到输入物的无边缘增强再现像如图 χ_a)所示。将光栅写入光强比调整为 0.1 ,得到的输入物再现像如图 χ_b)所示 ,可以看到与低频成分相关的均匀透光部分被明显削弱 ,而与高频成分相关的图像边缘部分被明显地增强。

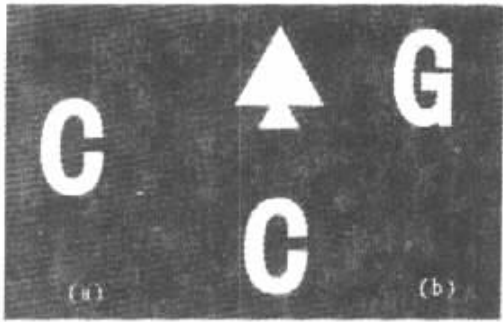


Fig.2 The binary images as the input of the system

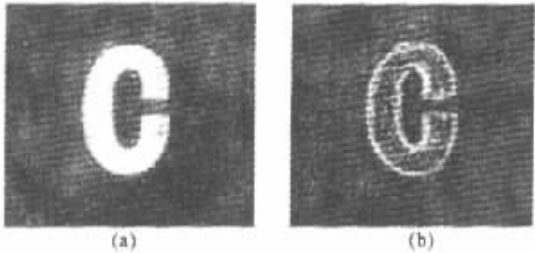


Fig.3 Experimental results of the optical image edge enhancement. (a) The reconstructed image without edge-enhancement ;(b) The reconstructed image with edge-enhancement

然后在 I_R 光路中加入 L_2 和 IP_2 ,并使 IP_2 与 IP_1 相同 ,同为字母“ C ”的二值化图像 ,实验得到输入物的光学自相关。图 4 (a)和图 4 (b)分别给出了无边缘增强和边缘增强的光学自相关实验结果的三维强度分布图 ,很容易看出边缘增强相关有更尖锐的自相关峰 ,图 4 (a)中自相关峰的半最大值宽度 (FWHM)是图 4 (b)中相关峰的半最大值宽度的 4 倍。

当选择图 χ_a)中“ C ”二值化图像作为输入的参考物 IP_1 ,图 χ_b)中所示二值化图像作为待检测的靶物 IP_2 时 ,实现了光学相关模式识别检测 ,实验结果的三维强度分布图如图 5 所示。

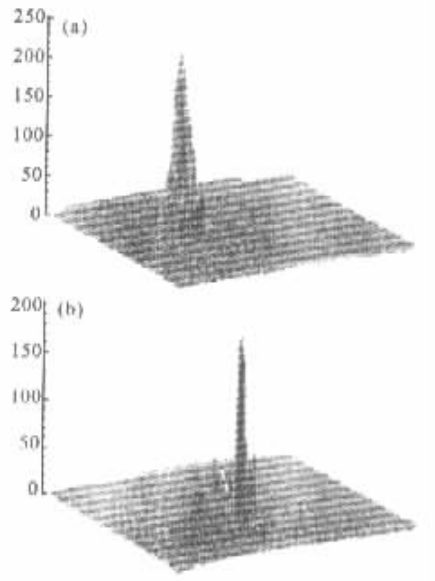


Fig.4 3-D plots of the optical image correlation result. (a) Without edge enhancement ;(b) With edge enhancement

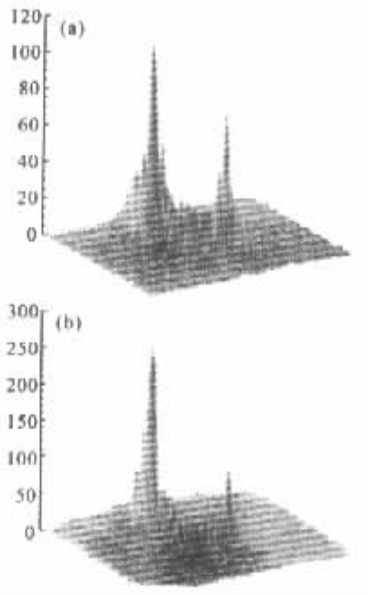


Fig.5 The experimental results of optical pattern recognition. (a) Without edge-enhancement ; (b) With edge-enhancement

图 χ_a)对应无边缘增强结果 ,图 χ_b)对应边缘增强结果 ,对比图 5 (a)和 5 (b)可看出 ,图像边缘增强操作不仅使自自相关峰变得更尖锐 ,而且抑制了自相关峰的边瓣强度和互相关峰的强度。图 5 (a)中自相关峰和互相关峰的强度比为 1.3 : 1 ,图 5 (b)中自相关峰和互相关峰的强度比约为 2.2 : 1 ,在相同的实验条件下边缘增强操作使自相关峰与互相关峰

的强度比增强了近一倍。众所周知,相关模式鉴别率不仅取决于自相关峰的强度和半值全宽度,而且取决于自相关峰和互相关峰的强度比以及自相关峰和背景噪声的强度比^[5]。在图 5(a)中自相关峰和背景噪声的强度比约为 15:1,图 5(b)中自相关峰和互背景噪声的强度比为 27:1,边缘增强操作使自相关峰与背景噪声的强度比也增强了近一倍。因此系统的信噪比和相关模式鉴别率得到了显著的提高。

结论 利用 Ce:KNSBN 晶体的非线性衍射特性在相干匹配滤波系统中实现了光学图像的边缘增强光学相关模式识别,图像边缘增强操作使自相关峰变得更尖锐,半最大值全宽度降低了 75%,自相关峰和互相关峰的强度比提高近一倍,同时还抑制了自相关峰的边瓣强度和背景噪声,提高了系统的信噪比和相关鉴别率。

参 考 文 献

- [1] Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics*(傅里叶光学导论). Translated by Zhan Dasan. Beijing: The Science Press, 1979. 189~190(in Chinese)
- [2] Liu Simin, Guo Ru, Ling Zhenfang. *Nonlinear Optics of Photorefractive Effect*(光折变非线性光学). Beijing: China Standard Publishing House, 1992. 265~266(in

- Chinese)
- [3] Yu F T S, Jutamulia S. *Optical Pattern Recognition*. New York: Cambridge University Press. 1998. chapter11, 287~318
- [4] White J O, Yariv A. Real-time image processing via four-wave mixing in a photorefractive medium. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**(1) 5~7
- [5] Connors L, Foote P, Hall T J *et al.*. Fidelity of real-time correlation by four-wave mixing. *Proc. SPIE*, 1984, **492** 361~369
- [6] Wang Z Q, Soutar C, Gillespie W A *et al.*. Real-time edge-enhanced object correlation using incoherent readout of photorefractive BSO. *Optik*, 1993, **93**(4):157~162
- [7] Wang Zhaoqi, Zhang Hui, Cartwright C M *et al.*. Edge enhancement by use of moving gratings in bismuth silicon oxide crystal and its application to optical correlation. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(20):4449~4456
- [8] Hall T J, Jaura R, Connors L M *et al.*. The photorefractive effect-a review. *Prog. Quant. Electron.*, 1985, **10**(2):77~146
- [9] Liang Baolai, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang *et al.*. Diffraction properties of transmission photorefractive volume gratings in a Ce:KNSBN crystal. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(26):5552~5555
- [10] Liang Baolai, Wang Zhaoqi, Fu Rulian *et al.*. Optical image edge-enhancement via the nonlinear diffraction property of Ce:KNSBN photorefractive crystal. *J. Optoelectronics Laser*(光电子·激光), 2001, **12**(1):80~(in Chinese)

Discrimination Enhancement of Optical Correlation Pattern Recognition Via Ce:KNSBN Photorefractive Crystal

Guo Qinglin Fu Guangsheng Liang Baolai Zhang Jinping Wei Yanhong
(College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002)
(Received 28 May 2001; revised 9 August 2001)

Abstract: The theoretical analysis and experimental results of real-time edge-enhanced optical correlation pattern recognition via a Ce:KNSBN photorefractive crystal in the coherent matched filter system are given. The full-width-at-half-maximum(FWHM) of the auto-correlation peak is decreased 75%. The intensity ratio of the auto-correlation peak and the cross-correlation peak increases nearly one time by the edge-enhancement operation. The lobe and intensity of the auto-correlation peak are obviously depressed. The enhancements of signal to noise ratio and discrimination capability of the system are achieved obviously.

Key words: pattern recognition; edge-enhanced optical correlation; photorefractivity