

利用两种响应时间不同的光折变晶体 实现仅对物体变化部分成像*

陈安涛 范少卿

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

丁宏玉 吴存恺

(中国科学院安徽光学精密机械研究所激光光谱学开放实验室, 合肥 230031)

提 要

用两种响应时间相差很大的光折变晶体 $\text{Ce}:\text{SBN}$ 和 $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ 作为相位共轭迈克尔逊干涉仪的两个相位共轭镜, 得到同一物体的两个有时间差的相位共轭像, 再对这两个像做实时“异或”运算, 就能实现仅对物体随时间变化部分的成像. 这种方法可以大大增加两相位共轭镜的响应时间差, 具有最小可探测速度低, 输出信号强、输出保持时间长的优点. 文中对此作了理论分析, 并提供了该系统对真实物体成像的实验结果.

关键词 光学信息处理, 光折变晶体, 光学相位共轭, 相位共轭镜.

1 引 言

近年来, 借助光折变晶体中的四波混频产生的光学相位共轭波, 已在图像加减、边缘增强、相关等实时光学信息处理^[1]方面得到广泛应用.

利用光折变晶体内折射率光栅的记录和擦除的过渡过程, 还可以进行图像的时间域处理. 根据这一特点, 国外已发表了利用 BTO 晶体结合液晶空间光调制器^[2]以及利用 BSO 晶体在光栅周期和照射功率不同时响应速度的差异^[3]来实现图像时间微分的方法. 但前者需要与电子系统相结合; 后者因同一晶体由于光栅周期和照射功率的不同所产生的响应时间的差别不可能很大, 使得反映物体变化的输出信号不但强度弱, 而且保持时间短, 对缓慢变化或低速移动的物体尤为明显. 本文报道的是利用两种响应时间相差较大的光折变晶体 $\text{Ce}:\text{SBN}$ 和 $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ 作为相位共轭迈克尔逊干涉仪的两个相位共轭反射镜实现仅对物体变化部分成像及运动检测和光学跟踪的方法. 与国外报道的方法^[3]相比, 它将运动物体的最小可探测速度降低了约三个数量级, 并具有响应时间调节范围宽、输出信号强、保持时间长的优点. 此方法可用于监测仪器中, 以消除静止背景的像而只对运动的或形状位置发生变化的物体成像, 实现光学跟踪和运动检测, 大大提高对运动目标的观察灵敏度.

2 方法原理

收稿日期: 1992年1月20日; 收到修改稿日期: 1992年3月24日

* 本课题得到国家自然科学基金资助.

利用两种光折变晶体响应时间的差异实现仅对物体变化部分成像的光路原理如图 1 所示. 激光束经扩束透镜和分束后分别会聚于两个光折变晶体相位共轭反射镜(PCM)上. BS 的正向透射和反射系数分别为 t 和 \bar{r} , 反向反射系数为 \bar{r}' . 对于无损介质膜分束镜, 有 $\bar{r}' + r' + \bar{r} + t = 0$ ^[4]. 物体位于 z_2 处, 遮挡住了一部分光束, 它的透过率函数 $T(x, y, t)$ 考虑不透明物体而言, 只取 0 和 1 两个值, 且无相位贡献.

空间调制为 $T(x, y, t)$ 的入射波经两 PCM 反射后成为具有空间调 $R_1(x, y, t)\exp(j\delta_1)$ 和 $R_2(x, y, t)\exp(j\delta_2)$ 的相位共轭波. $R_{1,2}(x, y, t)$ 是实函数, $\delta_{1,2}$ 是两 PCM 引入的相移, 因为 $T(x, y, t)$ 无相位贡献, $\delta_{1,2}$ 为常数. 两束相位共轭波在 $z_{35} = z_{23}$ 处的观察屏 S 上总的复振幅和光强分布分别为

$$u(x, y, t) = A\bar{r}'t \exp\left(jk \frac{x^2 + y^2}{2z_{24}}\right) [R_2(x, y, t)\exp(j\delta_2) - R_1(x, y, t)\exp(j\delta_1)],$$

$$I(x, y, t) = C |R_2(x, y, t)\exp(j\delta_2) - R_1(x, y, t)\exp(j\delta_1)|^2. \quad (1)$$

式中 A 为复常数 $k = 2\pi/\lambda$, $C = |A\bar{r}'t|^2$.

光折变晶体在记录和擦除过程中, 相位共轭波的强度随时间按指数规律变化^[5]. 因此, 相位共轭镜的系统传递函数为 $G_i(s) = R_{i0}/(\tau_i s + 1)$ 的形式, 与此对应的输出 $R_i(x, y, t)$ 与输入 $T(x, y, t)$ 的关系如下

$$\begin{cases} \tau_{iR} \frac{dR_i(x, y, t)}{d\zeta} + R_i(x, y, t) = R_{i0}T(x, y, t), \\ R_i(x, y, t) < R_{i0}T(x, y, t), \\ \tau_{iE} \frac{dR_i(x, y, t)}{dt} + R_i(x, y, t) = R_{i0}T(x, y, t), \\ R_i(x, y, t) \geq R_{i0}T(x, y, t), \\ i = 1, 2, \end{cases} \quad (2)$$

式中 R_{i0} 为两相位共轭镜记录到饱和状态时的相位共轭反射率, τ_{iR} 和 τ_{iE} 分别为记录和擦除时间常数, 只要知道 $T(x, y, t)$ 和初始条件 $R_i(x, y, t)|_{t=0}$, 由(2)式即可求出任意时刻的输出 $R_1(x, y, t)$ 和 $R_2(x, y, t)$.

当两相位共轭镜满足

$$\tau_{1R} \ll \tau_{2R}, \quad \tau_{1E} \ll \tau_{2E}, \quad R_{10} = R_{20}, \quad \delta_1 = \delta_2 + 2n\pi, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

时,

$$I(x, y, t) = C |R_1(x, y, t) - R_2(x, y, t)|^2. \quad (4)$$

系统的输出为两相位共轭镜输出的“异或”, 并可得到下列结论.

1) 光路中没有物体时, 系统达到稳态后屏幕上输出为全黑.

此时 $T(x, y, t) = 1$, $R_{1,2}(x, y, t)|_{t=0} = R_{1,2}(x, y, 0)$ 任意, 由(2)可得到 $R_i(x, y, t) = R_{i0} - [R_{i0} - R_i(x, y, 0)]\exp(-t/\tau_{iR})$, 当 $t \gg \tau_{2R}$ 时 $R_{1,2}(x, y, t) \doteq R_{i0}$. 由公式(4), $I(x, y, t) \doteq 0$, 屏幕上每一

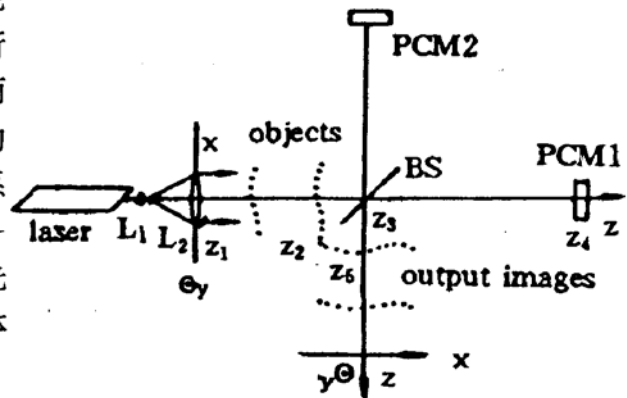


Fig. 1 Principle diagram of optical novelty filtering with two different photorefractive crystals. PCM: phase conjugate mirror; BS: Beam splitter; L: lens

点光强为零.

2) 对于光路中新出现的物体,屏上将显出它的强度反转像,然后逐渐消退;这时若将该物体移出,将再现相似的现象.

由初始条件 $R_{1,2}(x, y, t)|_{t=0} = R_{10}$, $T(x, y, t)|_{t=0} = T_0(x, y)$ 及公式(2)和(4)有

$$I(x, y, t) = CR_{10}^2 [1 - T_0(x, y)]^2 \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_{1R}}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{2R}}\right) \right]^2. \quad (5)$$

当 $\tau_{1R} < t < \tau_{2R}$ 时, $I(x, y, t) \propto [1 - T_0(x, y)]^2$, 显示出物体的反转像. 当 $t \gg \tau_{2R}$ 时, $I(x, y, t) \doteq 0$, 像逐渐消退. 如此时移开物体, 即 $R_{1,2}(x, y, t)|_{t=t_0} = R_{10}T_0(x, y)$, $T(x, y, t)|_{t \geq t_0} = 1$, $t_0 \gg \tau_{2R}$, 由公式(2)和(4), 将得到

$$I(x, y, t) = CR_{10}^2 [1 - T_0(x, y)]^2 \left[\exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_{1R}}\right) - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_{2R}}\right) \right]^2, t \geq t_0. \quad (6)$$

(6)式与(5)式具有相同变化规律,仅时间常数不同,观察到的现象与物体放入时相似.

3) 有运动物体经过时,系统的输出为该物体运动的强度反转像或运动方向上前后沿的轮廓. 对屏上任意一点 (x, y) 加以考查,根据该点被物体遮挡住时间 t_0 不同,出现两种不同的情况.

当遮挡时间较短, $\tau_{1R} < t_0 < \tau_{2R}$ 时,由(2)式和(4)式可得到该点光强变化近似为

$$I(x, y, t) \doteq \begin{cases} 1, & t < 0, t > t_0 \\ CR_{10}^2 & 0 \leq t \leq t_0. \end{cases} \quad (7)$$

说明屏上每一点在被遮挡期间都由暗变亮,显现出与运动物体对应的强度反转像.

当该点被物体遮挡时间较长, $t_0 \gg \tau_{2R}$ 时,物体切入该点时,其光强按(5)式的规律变化,物体离开该点时,其光强按(6)式的规律变化.在物体切入和离开任何一点时,该点各闪亮一次,屏上看到的是物体在运动方向上的前后亮边缘.

综合以上分析的结论可知,采用这种方法,在长时间静止的背景上若同时存在运动的或形状和位置发生变化的物体时,静止背景受到抑制,在屏幕上只能观察到与背景不重叠的运动物体或物体形状和位置变化的部分.

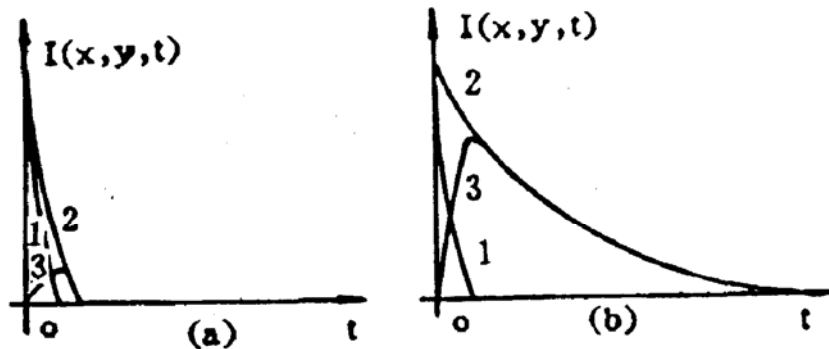


Fig. 2 The effect of the difference between two PCMs' response times on the final output. 1—Output of PCM1; 2—Output of PCM2; 3—Final output. (a) $\tau_{1R} \sim \tau_{2R}$, (b) $\tau_{1R} \ll \tau_{2R}$

由(5)式可知,系统对新物体的输出 $I(x, y, t) \propto [\exp(-t/\tau_{1R}) - \exp(-t/\tau_{2R})]^2$. 当 τ_{2R} 和 τ_{1R} 的差别增大时,输出信号的强度和保持时间也随之增加,如图 2 所示. 输出响应时间为 τ_{1R} , 保持时间为 τ_{2R} 系统对运动物体的最小可探测速度为^[3]

$$V_{\min} = d / \min(\tau_{2R} - \tau_{1R}, \tau_{2R} - \tau_{1R}). \quad (8)$$

式中 d 为观察屏上的成像分辨率. 显然采用两种响应时间相差很大的光折变晶体作为两个相

位共轭镜,可以大大降低 V_{\min} 并增强输出信号.

运动物体的最大可探测速度由时间常数小的相位共轭镜决定,如果物体的遮挡时间太短, $t_0 < \min(\tau_{1E}, \tau_{2E})$, 则任何一个相位共轭镜对它都不能响应,故

$$V_{\min} = d' / \min(\tau_{1E}, \tau_{2E}), \quad (9)$$

d' 为物体在运动方向上的线度.

要降低输出响应时间、延长保持时间,或扩大对运动物体的可探测速度范围,应尽量选时间常数小的晶体和时间常数大的晶体匹配,作为两相位共轭镜的一对组合. 因为两相位共轭镜采用不同的晶体,它们输出的相位共轭波的振幅和初相位不同,需加以补偿以满足(3)式的后两个条件,经实验发现通过改变输出较强的相位共轭镜的读出光的衰减量和初相位,就能改变它的相位共轭波的振幅和初相位,使之与另一束相位共轭波一致. 具体方法是在读出光中加入一片透过率适当的中性滤光片,使它输出的相位共轭波略强于另一束相位共轭波. 再通过在水平方向上转动滤光片,增加它在光路中的有效厚度来进一步微调. 随着有效厚度的增加,相位共轭波的振幅缓慢下降,而初相位则作周期性的快速变化,可以找到某一位置使两束相位共轭波的振幅和初相位都一致,即无物体时两相位共轭镜达到稳态后屏幕上干涉相消. 这种调整方法通过改变一个调整量就能在一定范围内对振幅和相位两个量进行调节.

3 实验及结果

实验光路如图 3 所示. 激光束经扩束后通过物体. 由 BS5 分为两束分别聚焦于两块光折变晶体上,作为两相位共轭镜的探测波. 它们的相位共轭波在 BS5 上重新汇合,输出结果位于场镜 L3 附近,由 L4 投影于观察屏 S 上.

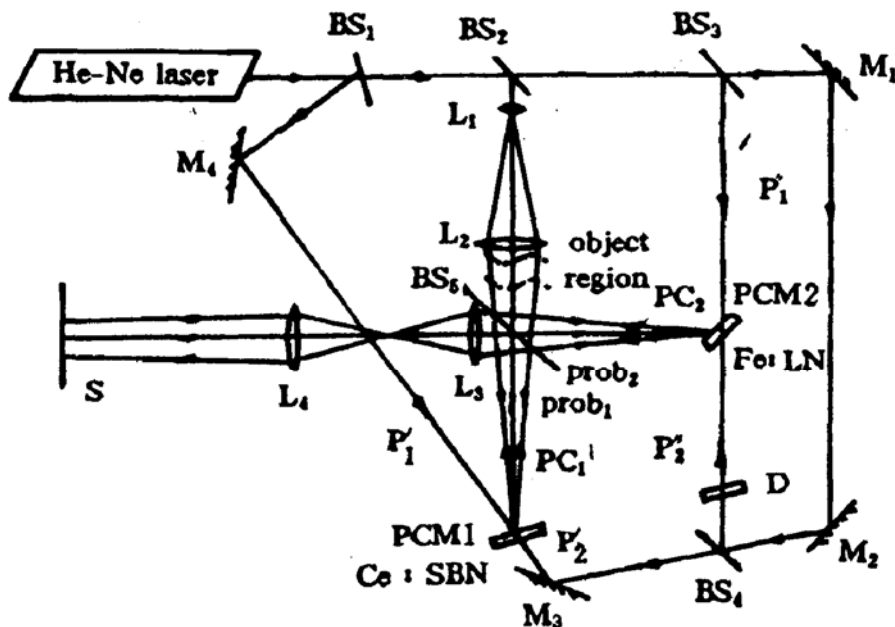


Fig. 3 Experimental set-up for optical novelty filtering with SBN and LN. M—Mirror; D—Neutral density filter, used to adjust the amplitude and phase shift of PC₂; S—Screen; P—Pump beam; Prob—Probe beam; PC—Phase conjugate beam; PCM1—Ce : SBN, $\tau_{1R} = 1$ s, $\tau_{1E} = 0.45$ s; PCM2—Fe : LiNbO₃, $\tau_{2R} = 180$ s, $\tau_{2E} = 540$ s

光路中无变化的物体时,两相位共轭镜达到稳态时输出的光束强度一致,经“异或”运算后均匀抵消,屏幕为暗视场.这时在光路中放入一根 $\varnothing=0.5\text{ mm}$ 的垂直金属丝作为物体,PCM1很快对此作出反应,输出如图4(a)所示;而PCM2的反应很慢,如图4(b).它们的差别显示在屏幕上,即该物体的强度反转像,见图4(c)经过30 min后此像已逐渐消退,屏幕恢复均匀暗视场.这时另一同样直径的水平金属丝自下而上切入光路,屏上显示出它的运动像,而原先的垂直金属丝作为静止背景受到抑制,如图5所示.



Fig. 4 The system's response to a new object 1s after it is placed in. Object — A metal wire of 0.5 mm in diameter (a) Output of PCM1. (b) Output of PCM2. (c) final output, the “Ex-or” result of (a) and (b)

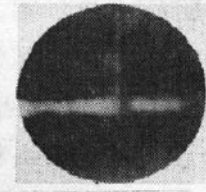


Fig. 5 Output of a moving object against the static background. After the same object as in Fig. 4 is kept static for 30 min, a horizontal metal wire of the same diameter is sweeping upward at the rate of 0.1 mm/s.

4 讨论与结论

与利用同一晶体在不同入射光强和光栅周期下的响应时间差实现时间微分成像的方法^[3]相比,本文报道的方法将两相位共轭镜的响应时间差的数量级由 10^{-1} s 增加到 10^2 s ,即将最小可探测速度降低了三个数量级.如采用响应时间更长的光折变晶体,还可进一步降低.

如果BS不是无损耗介质型,则(1)式中代表相位共轭镜输出的两项,将分别引入额外的振幅衰减和相移.因为前述的调节方法能对通过分束镜后较强的相位共轭波的衰减量和初相位任意调节,所以原理上仍能使通过分束镜的两束相位共轭波的振幅和相位一致,这就说明BS可不必限于无损耗介质型.

在实验光路的BS₅与两相位共轭镜之间对称地放入两透明片图像,可实现图像实时相减和强度反转^[6,7].如微调D使 $\delta_2 = \delta_1 + (2n + 1)\pi$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$,则输出为这两幅透明片图像的相加.

理论分析和实验结果表明,用响应时间不同的光折变晶体作为相位共轭迈克尔逊干涉仪的相位共轭镜,可以实现仅对不透明物体变化部分成像.因为两种光折变晶体的响应时间可以差别很大,这种方法可大大降低最小可探测速度,延长输出保持时间并增强输出信号.通过选择不同的晶体组合及改变晶体上的照射功率和光栅周期,可以灵活地改变两相位共轭镜的响应时间和时间差,适应不同使用要求.这种方法是全光学型的,能对真实物体进行实时处理.

参 考 文 献

- [1] J. P. Huignard, P. Gunter, P. Gunter, J. P. Huignard, Eds., Optical processing using wave mixing in photorefractive crystals. *Photorefractive materials and their applications II*, Berlin, Springer-Verlag, 1989, 237~

243

- [2] D. Z. Anderson, D. M. Lininger, J. Feinberg, Optical tracking novelty filter. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(2):123~125
- [3] J. A. Khoury, G. Hussain, R. W. Eason, Optical tracking and motion detection using photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. *Opt. Comm.*, 1989, **71**(3-4):138~144
- [4] Z. Knittle, *Optics of Thin Films*. New York: Wiley, 1976:242
- [5] P. Gunter, H. J. Eichler; P. Gunter, H. J. Eichler, Eds., Introduction to photorefractive materials. *Electro-Optical and Photorefractive Materials*, Berlin: Springer-Verlag, 1986:206~228
- [6] Sze-Keung Kwong, George A. Rakuljic, A. Yariv, Real time image subtraction and "exclusive-or" operation using a self pumped phase conjugate mirror. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(3):201~203
- [7] A. E. Chio, P. Yeh, Parallel image subtraction using a phase-conjugate Michelson interferometer. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(5):306~308

Novelty filtering imaging with two photorefractive crystals greatly different in response times

CHEN Antao FAN Shaoqing

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

DING Hongyu WU Cunkai

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei 230031)

(Received 20 January 1992; revised 24 March 1992)

Abstract

We present a method to implement novelty filtering and motion detection with two photorefractive crystals greatly different in response times as the two PCMs of a phase conjugate Michelson interferometer. Because this arrangement allows different combinations of crystals, the difference between the response times of the two arms can be very large and highly tunable, therefore the minimum detectable velocity of the moving object is significantly reduced and a strong and lasting image of the displaced object is obtained. We also report a method to equalize the phases and amplitudes of the phase conjugate waves from two crystals. Theoretical analysis of the relationship between the changing object and the output and experimental results are given.

Key words optical information processing, photorefractive effect, optical phase conjugation, PCM (phase conjugate mirror).