

# 相位共轭反馈光波用于图像衬度控制

尚庆虎 于美文

(北京理工大学工程光学系, 100081)

**提要:** 本文提出了一种利用双相位共轭反射镜的实时图像衬度控制方法。给出了理论分析, 提出了一种实验方案, 给出了模拟实验结果。

**关键词:** 衬度控制, 相位共轭, 反馈

## Contrast control with optical phase conjugate feedback

*Shang Qinghu, Yu Meiwen*

(Optical Engineering Depr., Beijing Institute of Technology, Beijing)

**Abstract:** A method is put forward for controlling the contrast of optical images in real-time by using two phase conjugate mirrors. The theoretical analysis is made, an experimental scheme is proposed and the simulation results are given.

**Key words:** contrast control, conjugation, feedback

在图像处理中, 常常需要改变图像的衬度以提高对图像的识别能力。本文提出了一种利用相位共轭反射光波作为反馈的相干光学图像衬度控制法。由于共轭光波和探测光波的传播方向相反、波前重合, 从而可消除系统中的相位畸变<sup>[1, 2]</sup>, 降低了对光学系统中的光学元件质量的要求, 自动消除了透明图片相位噪声对输出图像的影响, 无需加液门, 可实时操作, 简化了处理过程。若用四波混频法实现相位共轭反射, 则当调节任一泵浦光波的入射相位和振幅时, 都可起到控制输出图像衬度的作用。本文给出了这种图像衬度控制方法的理论分析, 提出了一种实验方案, 进行了计算机模拟实验, 验证了理论分析的正确性。

### 一、理论分析

图1是相位共轭反射光波作为反馈进行图像衬度控制的实验原理图。振幅为  $A_0$  的平面相干光波透过共轭反射镜  $PCM_1$  照射到要处理的透明图片  $T$  上, 振幅为  $A'_0$ , 它透过  $T$  后入射到共轭反射镜  $PCM_2$  上被共轭反射回照射  $PCM_1$  并再次共轭反射。当光波在  $PCM_1$  和  $PCM_2$  之间多次往返时, 一部分被分束镜  $BS$  反射作为输出光波照射到观察屏  $P$  上。并且每次反射的透明图片共轭像都与原图片自动重合。

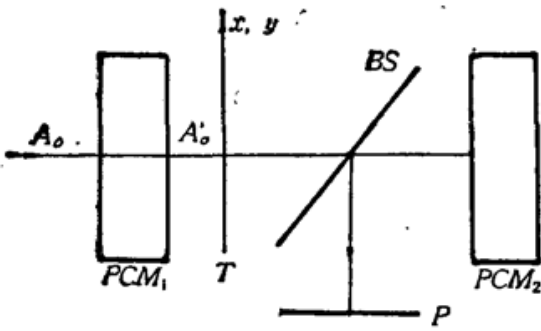


Fig. 1 Schematic diagram of a contrast control system with PCMs

设  $BS$  的复振幅反射系数和透射系数分别为  $r_{BS}$  和  $t_{BS}$ , 强度反射率和透过率为  $R_{BS}$  和  $T_{BS}$ 。  $PCM_1$  和  $PCM_2$  的振幅反射系数分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$ ,  $PCM_1$  的透射系数为  $\tau_1$  (当泵浦光波强度远大于探测光波强度时, 共轭反射率成为与入射探测光波强度无关的常数<sup>[3~6]</sup>)。 如果以  $\tau(x_0, y_0)$  和  $T(x_0, y_0)$  代表透明图片的复振幅透射系数和光强透过率, 作类似于法布里-帕罗干涉仪的推导, 并考虑反射是共轭反射, 可以得到各次反射后的出射光波的复振幅分布:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= [A'_0 \tau(x, y) t_{BS}]^* \cdot \rho_2 \cdot r_{BS} \\ E_2 &= E_1 \cdot \rho_1^* \rho_2 \cdot T_{BS} \cdot T(x, y) \\ E_3 &= E_1 \cdot [\rho_1^* \rho_2 T_{BS} T(x, y)]^2 \\ &\vdots \\ E_N &= E_1 [\rho_1^* \rho_2 T_{BS} T(x, y)]^{N-1} \\ &\vdots \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中  $T_{BS} = |t_{BS}|^2$ ,  $T = |T(x, y)| = |\tau(x, y)|^2$ 。

上式中隐含  $\rho_1, \rho_2$  为常量。由(1)式可见当光束在  $PCM_1$  和  $PCM_2$  之间做多次反射时, 图片和分束镜复振幅透射系数的相位部分对输出光束没有影响, 这是共轭光波消除相位畸变所造成的, 是本方法的一个特点。

一般情况下,  $PCM_1$  和  $PCM_2$  之间的循环增益  $|\rho_1^* \rho_2 T_{BS} T(x, y)| = |\rho_1 \rho_2| T_{BS} T < 1$ 。忽略图像放大率, 并考虑观察屏上坐标和图片上坐标相同, 可得到输出光场复振幅分布:

$$\begin{aligned} T' &= E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_N + \dots \\ &= E_1 [1 + (\rho_1^* \rho_2 T_{BS} T) + (\rho_1^* \rho_2 T_{BS} T)^2 + \dots + (\rho_1^* \rho_2 T_{BS} T)^N + \dots] \\ &= \frac{[A'_0 t_{BS} \tau(x, y)]^* \rho_2 \cdot r_{BS}}{1 - \rho_1^* \rho_2 T_{BS} T(x, y)} \end{aligned} \quad (2)$$

和输出图像的强度分布:

$$\begin{aligned} T'(x, y) &= |\tau'(x, y)|^2 \\ &= \frac{I_0 |\rho_2|^2 T_{BS} R_{BS} T(x, y)}{1 + |\rho_1 \rho_2|^2 \cdot T_{BS}^2 T^2(x, y) - 2 |\rho_1 \rho_2| T_{BS} T(x, y) \cos \Delta\phi} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $I_0 = A_0'^2$ ,  $\Delta\phi$  是  $\rho_1, \rho_2$  的相位之差, 即  $\rho_j = |\rho_j| e^{i\phi_j}$ ,  $j=1, 2$ , 则  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ 。由(3)式可见在输出屏上图像强度分布与原图片强度透过率分布成非线性关系, 即衬度发生了变化。如果两个共轭反射镜是由简并四波混频方法实现的, 那么通过改变泵浦光波的相位和光强, 可以调节(3)式中的  $\Delta\phi$  和  $|\rho_1 \rho_2| T_{BS}$  值<sup>[3]</sup>, 从而达到调节输出图像衬度的目的。

当  $\Delta\phi = 2m\pi$  ( $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) 时, 输出图像强度最大; 当  $\Delta\phi = (2m+1)\pi$  时, 输出图像强度最小; 当  $\Delta\phi$  在  $2m\pi \leq \Delta\phi \leq (2m+1)\pi$  之间变化时, 输出图像强度也就在前两种情况下的强度之间变化。因此对不同  $\Delta\phi$  值, 输出像强度不同, 为了便于说明问题, 将(3)式归一化:

$$T'_d(x, y) = \frac{[1 + |\rho_1 \rho_2|^2 T_{BS}^2 - 2 |\rho_1 \rho_2| T_{BS} \cos \Delta\phi] \cdot T(x, y)}{1 + |\rho_1 \rho_2|^2 T_{BS}^2 T^2(x, y) - 2 |\rho_1 \rho_2| T_{BS} T(x, y) \cos \Delta\phi} \quad (4)$$

图2是  $\Delta\phi$  不同时,  $|\rho_1 \rho_2| T_{BS}$  变化时对应的输出图像强度与输入图像的透过率关系曲

线。在图 2 中，曲线斜率为 1 的点对应输入输出图像的线性衬度变换。而当斜率大于或小于 1 时，输出像相应的透过率部分为衬度增强或降低。设线性变化直线  $T'_i(x, y) = T(x, y)$ ，它对应着  $|\rho_1\rho_2|T_{BS} = 0$ ，则一般来说，当  $T'_a(x, y) - T'_i(x, y) > 0$  时，表示曲线在线性变化直线上面，说明图像衬度在透过率较大部分下降，在透过率较小部分增强，这适宜于曝光不足图像的衬度增强等；当  $T'_a - T'_i < 0$  时，则正好相反。后者适合于背景噪音较大的图像的衬度增强等。由 (4) 式可以得到  $T'_a(x, y) - T'_i(x, y) \geq 0$  成立的必要条件是

$$\cos \Delta\phi \geq \frac{1}{2} |\rho_1\rho_2| \cdot T_{BS} \cdot [1 + T(x, y)] \tag{5}$$

(5) 式是针对图像上具体点的透过率而言的。对整幅图像，(5) 式变为

$$\cos \Delta\phi < \frac{1}{2} |\rho_1\rho_2| \cdot T_{BS} \tag{6a}$$

或 
$$\cos \Delta\phi > |\rho_1\rho_2| \cdot T_{BS} \tag{6b}$$

由图 2(a)、(b) 和 (6) 式可以看出，一般情况下， $\Delta\phi$  值决定着图像衬度变化的趋势。而增益  $|\rho_1\rho_2|T_{BS}$  增大时， $T'_a$  和  $T$  的非线性关系增强，输出图像衬度变化增大。 $|\rho_1\rho_2|T_{BS}$  对衬度增强或减弱的趋势影响不大，而主要决定着衬度变化的程度或大小。

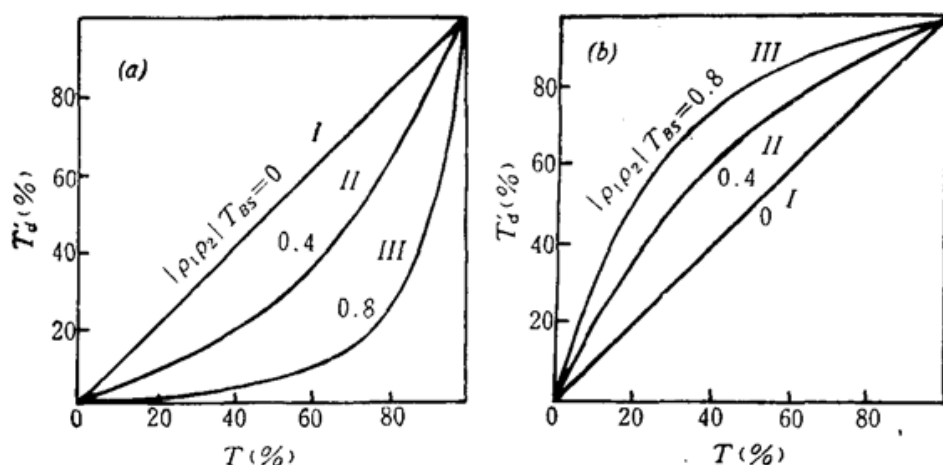


Fig. 2 Theoretical output vs input transfer characteristics for a set of  $|\rho_1\rho_2|$  values  
(a)  $\Delta\phi = 2m\pi$ , (b)  $\Delta\phi = (2m+1)\pi$

## 二、实验方案及模拟结果

图 3 是实现图像衬度控制的实验光路图。图中  $M_j (j=1, \dots, 5)$  是平面反射镜， $BS_j (j=1, 2, 3)$  是分束镜， $L_j (j=1, 2, 3)$  是透镜， $T$  为输入透明图片， $P$  是观察屏。 $PCM_1$  和  $PCM_2$  分别是由  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  (厚度 0.5 mm, 掺铁 0.1 mol%) 晶体简并四波混频实现的相位共轭反射镜。系统采用 He-Ne 激光器的 633 nm 波长照明。细激光束经  $BS_1$  分束后，一束由透镜  $L_1$  会聚照射到第一个相位共轭反射镜  $PCM_1$  上，它透过  $PCM_1$  后被透镜  $L_2$  准直再

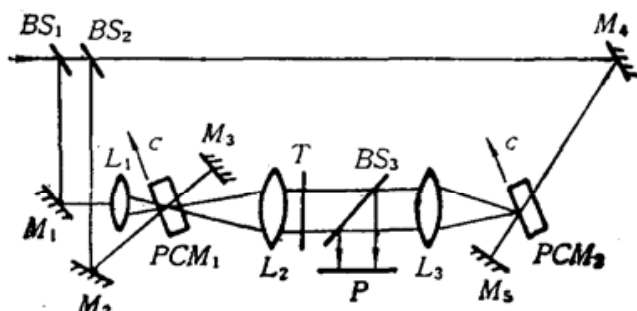


Fig. 3 Experimental arrangement for contrast control

透过输入图片  $T$  和  $BS_2$ , 然后由  $L_3$  会聚在第二个相位共轭反射镜  $PCM_2$  上。 $PCM_1$  和  $PCM_2$  的泵浦光波是来自同一激光器的反向传播的细光束对。 $PCM_1$  与  $PCM_2$  的共轭反射光波在多次反射过程中, 每一次循环都要在分束镜  $BS_3$  上反射出去一部分, 这些反射光波在观察屏  $P$  上形成输出像, 其衬度可以变化。当前后调节泵浦光路中  $M_3$  或  $M_5$  时, 入射泵浦光的相位发生变化, 从而使  $\Delta\phi$  值变化。由(3)、(4)两式可见, 这时就可以使输出像衬度发生变化, 完成图像衬度控制。

利用图 3 所示的光路获得了  $T(x, y)$  的实验曲线如图 4 所示。实验是在  $|\rho_1| \approx |\rho_2| \approx 0.8$

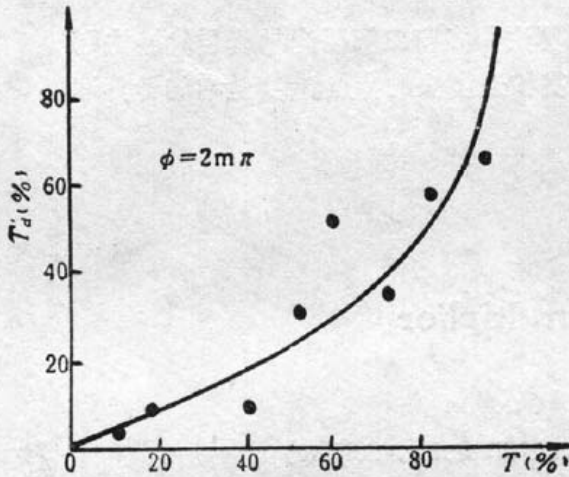


Fig. 4 Experimental output vs input transfer characteristics for  $|\rho_1\rho_2|T_{BS} \approx 0.6$

和  $T_{BS} \approx 0.9$  条件下进行的, 表明  $T'_d(x, y)$  和  $T(x, y)$  确实呈非线性关系, 即输出像的衬度改变是可行的。由于实验条件的限制, 没能获得质量好的输出图像。因此, 我们采用计算机做了模拟实验, 其结果如图 5、图 6 所示。图 5 是图像高透过率部分衬度增强的模拟结果, 它对应  $\Delta\phi = 2m\pi$  和  $|\rho_1\rho_2|T_{BS} = 0, 0.1, 0.4, 0.8$ ; 图 6 是图像低透过率部分衬度增强(即高透过率部分衬度减弱)的模拟实验结果, 对应  $\Delta\phi = (2m+1)\pi$  和  $|\rho_1\rho_2|T_{BS} = 0, 0.1, 0.4, 0.8$ 。

本文只讨论了反馈增益小于 1 的情况。而当反馈增益大于 1 时,  $PCM_1$  和  $PCM_2$  的共轭反射率与  $T$  有关, 输出像的衬度一般来说是降低, 甚至出现边缘效应, 因此不适于做图像衬度控制。使用质量好的光折变晶体, 可望获得更好的实时输出图像。

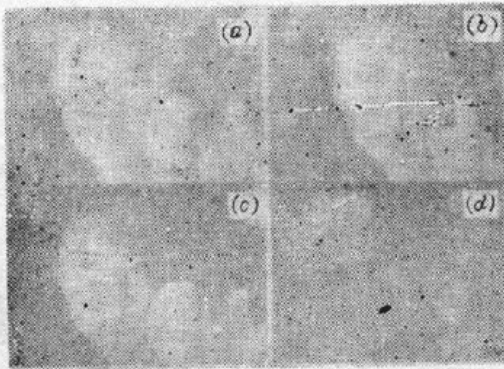


Fig. 5 Experimental results of contrast increasement with computer-simulations  
(a) the reference (b)、(c) and (d) contrast increasement

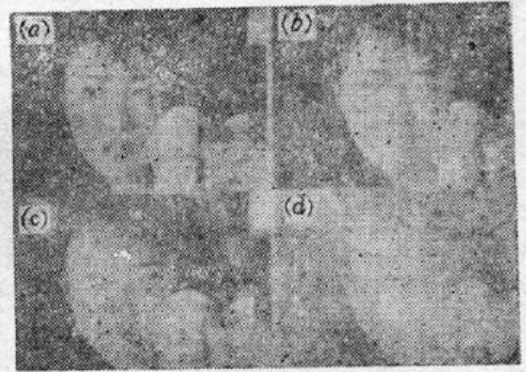


Fig. 6 Experimental results of contrast reducing with computer-simulations

### 参 考 文 献

- 1 A. Yariv. *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-14** (9), 650 (1978)
- 2 R. A. Fisher, *Optical Phase Conjugation*, 1983, Academic Press, New York, 539
- 3 B. Fisher *et al. Opt. Lett.*, **6** (11), 519 (1981)
- 4 M. Cronin-Golomb *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20** (1), 12 (1984)
- 5 A. Hardy, Y. Silberberg, *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (5), 594 (1983)
- 6 N. V. Kukhtarev *et al.*, *Ferroelectrics*, **22** (9), 961 (1979)