

一种新的消色像全息术

范 诚* 于美文

(北京理工大学工程光学系)

提 要

本文从全息再现像的物像关系出发,对准像面情况下,像点随波长及参考光源扩展的变化进行了研究。阐明了利用散射线光源作参考光使全可见光范围内的像叠加在一起,产生消色像全息图的基本思想,并引入了消色像域的概念。考虑到点基元全息图尺寸及人眼瞳孔对成像光束的限制,白光再现时,可以获得清晰、明亮、具有一定景深和相当视场范围的消色再现像。

关键词: 散射线光源,消色像域,像点扩展。

一、引 言

在现有的白光全息术中,只有少量的文献对消色像全息术进行了研究^[1~3]。在这些文献中,消色的关键就是使各种波长的像会聚于一点,从而避免了白光再现时像的色模糊。在本文的研究过程中,注意到光源的光谱展宽和空间展宽同时作用,可使全可见光波段的像点叠加在一起形成消色像,并提出了消色像域的概念;然后注意到像点本身的扩展与人眼所能看到的像点扩展是完全不同的两个概念。如果记录时对点基元全息图加以限制,就可以获得清晰、明亮的消色再现像。但在对再现像的分析过程中却超脱了所有文献中狭缝像的概念。这种直观的分析方法不仅成功地解释了利用散射线光源作参考光可以获得高质量的消色像全息图,而且也有助于对彩虹全息这一卓越过程的理解和深化,为白光显示技术开辟了一条新的途径。

值得一提的是Leith等人在像散彩虹全息中曾用一维散射器把再现像推广到白色^[4],但他考虑的实际上是像面全息的情况;另外,最近的文献[5]也曾注意并从理论上对空间和光谱展宽的光源再现彩虹全息图作出解释,但并没能给出一个令人信服的物理意义。本文的基本思想明确了这些物理过程,进一步深化了对彩虹全息的理解。

二、原 理

从点基元全息图正一级像的物像关系^[6]有

$$\left. \begin{aligned} z_I &= \frac{\lambda_0 z_c z_0 z_R}{\lambda_0 z_0 z_R + \lambda z_c (z_R - z_0)}, \\ x_I &= \frac{\lambda_0 x_c z_0 z_R + \lambda z_c (x_0 z_R - x_R z_0)}{\lambda_0 z_0 z_R + \lambda z_c (z_R - z_0)}, \\ y_I &= \frac{\lambda_0 y_c z_0 z_R + \lambda z_c (y_0 z_R - y_R z_0)}{\lambda_0 z_0 z_R + \lambda z_c (z_R - z_0)}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

收稿日期: 1988年1月20日; 收到修改稿日期: 1988年4月20日

* 现为四川大学物理系博士研究生。

式中 (x_0, y_0, z_0) , (x_R, y_R, z_R) , (x_c, y_c, z_c) , (x_I, y_I, z_I) 分别是物点, 参考光源, 再现光源, 像点的坐标。 λ_0 是记录波长, λ 是再现波长。采用在 XZ 平面 ($y=0$) 内一维扩展的散射线光源作参考光, 扩展量分别是 Δx_R 和 Δz_R , 如图 1 所示。用白光再现时, 像点的位置随波长和参考光源的扩展都有变化。由于在 Y 方向相当于记录了一同轴全息图, 色散影响很小可不考虑*。

1. 像点随波长的变化

对应于扩展参考光源中的某一点 (x_R, z_R) , 其像点 $O_I(x_R, z_R)$, 随波长的变化可由(1)式求出

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_{I\lambda} &= \frac{\partial z_I}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{\lambda_0 z_0 z_c z_R (z_0 z_c - z_R z_c)}{(\lambda_0 z_0 z_R + \lambda z_c z_R - \lambda z_0 z_c)^2} \Delta \lambda, \\ \Delta x_{I\lambda} &= \frac{\partial x_I}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{\lambda_0 z_0 z_c z_R [z_R(x_0 - x_c) + z_0(x_c - x_R)]}{(\lambda_0 z_0 z_R + \lambda z_c z_R - \lambda z_0 z_c)^2} \Delta \lambda_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

考虑在准像面情况下, 有

$$z_c, z_R \gg z_0, \quad x_0, x_R \gg x_c \quad (3)$$

化简(2)式可以得到

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_{I\lambda} &\approx -\frac{\lambda_0 z_0}{\lambda^2} \Delta \lambda, \\ \Delta x_{I\lambda} &\approx -\frac{\lambda_0 z_0 x_c}{\lambda^2 z_0} \Delta \lambda_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

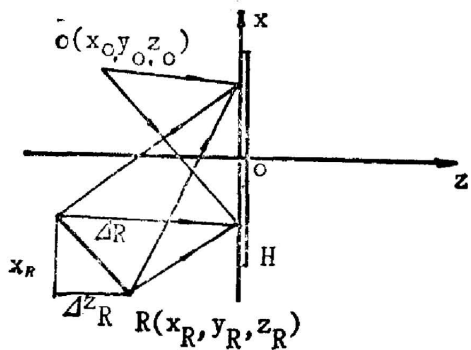


Fig. 1 Construction of the hologram with linear diffused reference beam

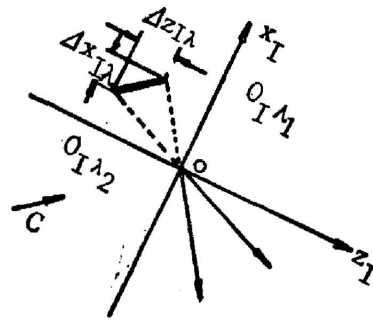


Fig. 2 Variation of the image position with wavelength ($\lambda_1 > \lambda_2$)

假定可见光范围是 400.0 nm ~ 700.0 nm, $\lambda_0 = 632.8$ nm, $\lambda = 550.0$ nm, $z_0 = 5$ mm, $x_c = (z_c/2) = 1$ m, 则 $2\Delta x_{I\lambda} = \Delta z_{I\lambda} = 3.14$ mm。图 2 给出了像点随波长的变化。

2. 像点随参考光源扩展的变化

对应于光源光谱扩展中某一波长 λ , 在准像面情况下, 像点 $O_I(\lambda)$ 随参考光源扩展的变化为

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_{Iz_R} &= -\frac{\lambda_0 z_0^2}{\lambda z_R^2} \Delta z_R, \\ \Delta x_{Ix_R} &= \frac{z_0 x_R}{z_R} \Delta z_R, \\ \Delta x_{Ix_c} &= -\frac{z_0}{z_R} \Delta x_{Rc} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于 $z_0 \ll z_R$, 故 Δz_{Iz_R} 很小, 可以忽略不计。

* 以下的讨论只在 XZ 平面内进行, 并只对原始像进行讨论。

$$\Delta x_{IR} = \Delta x_{IRz} + \Delta x_{IRx} = -z_0 \Delta \left(\frac{x_R}{z_R} \right) = -z_0 \operatorname{ctg} \theta_R \Delta \theta_R, \quad (6)$$

式中 $\operatorname{tg} \theta_R = (x_R/z_R)$ 。若 $\theta_R = 30^\circ$, $\Delta \theta_R = 20^\circ$, $z_0 = 5 \text{ mm}$, 则 $\Delta x_{IR} = 3.02 \text{ mm}$ 。图 3 给出了像点随参考光源扩展的变化。

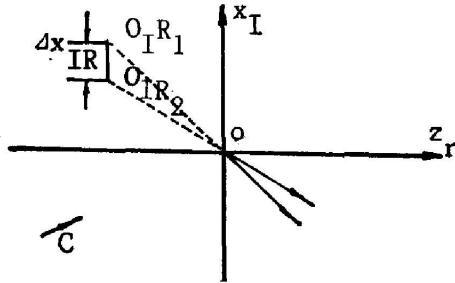


Fig. 3 Variation of the image position with the expatnding of reference beam

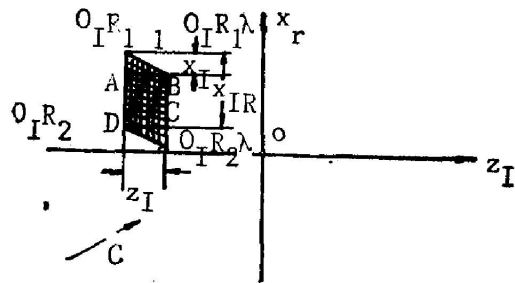


Fig. 4 Variation of the image position with both expandings of wavelength and reference beam

3. 消色原理和消色像域

考虑到光源光谱展宽和空间展宽的同时作用,可以得到

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_I &= \Delta z_{I\lambda} + \Delta z_{IR} = -\frac{\lambda_0 z_0}{\lambda^2} \Delta \lambda, \\ \Delta x_I &= \Delta x_{I\lambda} + \Delta x_{IR} = -\frac{\lambda_0 x_0 z_0}{\lambda^2 z_c} \Delta \lambda - z_0 \operatorname{ctg} \theta_R \Delta \theta_R, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

图 4 给出了像点变化的情况,对图 4,可作出如下解释:

(1) 假设可见光的波长范围是 $\lambda_2 = \lambda_1$, 参考光源的长度是 $R_2 - R_1$, 则 $O_{IR\lambda_1}$, $O_{IR\lambda_2}$, $O_{IR\lambda_3}$, $O_{IR\lambda_4}$ 分别表示光源和光谱端点的再现像, 像点在平行四边形 $O_{IR\lambda_1}$, $O_{IR\lambda_2}$, $O_{IR\lambda_3}$, $O_{IR\lambda_4}$ 内变化。

(2) 假设斜线代表同一参考光源的色模糊量, 竖线代表同一波长再现的线模糊量, 横线代表相同的 x_I , 那么, 斜线上的像点变化由光谱扩展唯一确定, 竖线上像点的扩展取决于参考光源的扩展。在区域 $ABCD$ 内, 对于相同的 x_I , 再现像由全波长的像点组成, 所以像是消色像, 称这个区域为消色像域。在消色像域外, 由于并没有包含全波长的像点, 像的白度逐渐降低, 一端显出红色, 另一端显出蓝色。

(3) 由于线模糊量在 z 方向为零, 因此在 z 方向上像的色散并不能得到补偿。如果记录时点基元全息图的尺寸 w_H 受到限制, 由此所引起的横向弥散却是很小的, 它并不影响像点的横向叠加, 从而对消色效果并无破坏作用。

(4) 由以上分析可以看出, 像点本身的变化随光源的光谱和空间扩展都是很大的, 远远超出了人眼的分辨能力。如果考虑到点基元全息图 w_H 以及观察时人眼瞳孔的限制, 人们将发现人眼所能看到的像点扩展, 远小于像点本身的扩展, 即仍能看到满意的消色像。

三、成像质量

1. 像的最小分辨距离

假设 $\Delta x'_i$ 是人眼所能观察到的全部像点扩展, $\Delta x''_i$ 是 $\Delta x'_i$ 中所有光能都进入人眼的像点

扩展, 则用能量分布的半宽度 Δx_i 来表示人眼所能观察的像的最小分辨距离为

$$\Delta x_i = \frac{\Delta x'_i + \Delta x''_i}{2} \quad (8)$$

设点基元全息图的尺寸为 w_H ; 人眼瞳孔的直径为 D_E ; 观察距离为 z_E ; 像点到全息图的距离为 z_I 。图 5 给出了如下两种情况的最小分辨距离示意图, 显然从图 5 可知 $\Delta x'_i = A'B'$, $\Delta x''_i = A''B''$, 并且从图中简单几何关系并考虑(8)式很容易算出:

(a) 当 $D_E > w_H > \frac{z_I}{z_I + z_E}$ 时

$$\Delta x_i = w_H + \frac{z_I}{z_E} w_H \quad (9)$$

(b) 当 $w_H < \frac{z_I}{z_I + z_E} D_E$ 时

$$\Delta x_i = \frac{z_I}{z_E} D_E \quad (10)$$

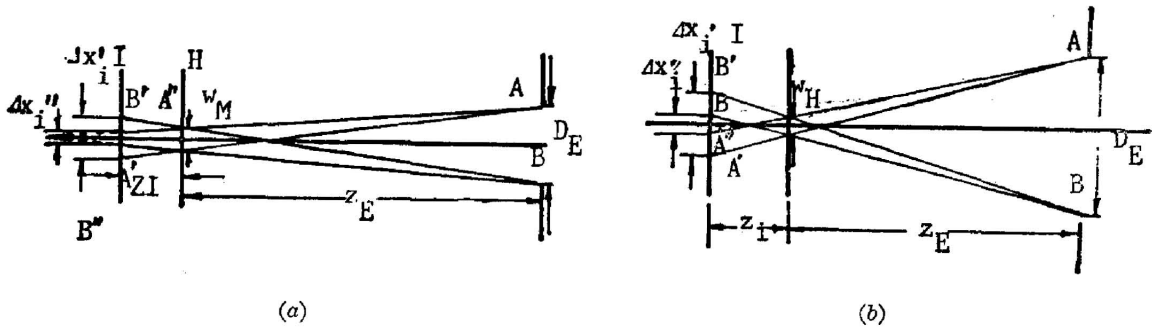


Fig. 5 Diagram for the minimum perceptive distance

从(a)、(b)两种情况可以看出 Δx_i 与像点本身的扩展无关, 它只取决于拍摄和再现全息图时各项参数的选取。一般来说 $z_E = 500 \text{ mm}$, $z_I = 5 \text{ mm}$, $D_E = 3 \text{ mm}$, w_H 满足(a)情况, 我们选择最佳的 w_H 使 Δx_i 为人眼的最小分辨距离; 人眼的视角分辨率为 $1' \approx 3 \times 10^{-4} \text{ rad}$, 考虑以上给出的数据有 $\Delta x_i = 0.15 \text{ mm}$, 代入(9)式可求出 $w_{H\text{最佳}} = 0.15 \text{ mm}$ 。

2. 纵向色散对横向叠加的影响

从(7)式中可以看出, 像的纵向色散无法由参考光源的扩展来补偿。计算在 w_H 的限制下, $O_{I\lambda_1}$ 到 $O_{I\lambda_2}$ 由纵向色散 $\Delta z_{I\lambda}$ 所引起的横向弥散 $\Delta x_{z\lambda}$, 如图 6 所示。从图 6 可以看出

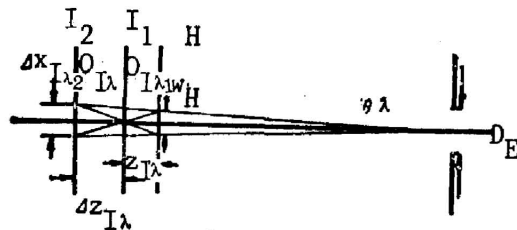


Fig. 6 The influence of longitudinal chromatic dispersion

$$\frac{\Delta x_{z\lambda}}{w_H} = \frac{\Delta z_{I\lambda}}{z_{I\lambda}} \quad (11)$$

从前述可以得出准像面情况下有

$$z_{I\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda} z_{I0} \quad (12)$$

把(11)、(12)式代入(7)式, 可得

$$|\Delta x_{z\lambda}| = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} w_H \quad (13)$$

$\Delta x_{e_i, \lambda}$ 对人眼的张角为

$$\Delta \theta_{\lambda} = \frac{w_H}{z_I + z_E} \frac{\Delta \lambda}{\lambda}, \quad (14)$$

把 $w_{H_{最佳}} = 0.15 \text{ mm}$ 代入(14)式, 令 $\Delta \lambda = 300 \text{ nm}$, $\lambda = 550 \text{ nm}$, 可以算出 $\Delta \theta_{\lambda} = 1.6 \times 10^{-4} < 1'$ 。即 $\Delta \theta_{\lambda}$ 小于人眼的视角分辨率。因此由于 w_H 的限制, 纵向色散并不影响各波长像点的横向叠加, 对消色效果并无损害。

四、实验结果

按照图 7 所示的光路, 拍摄了测微目镜的一步法消色像全息图如图 8 所示。图 7 中参考光束是激光束经玻璃棒发散后照射到毛玻璃而产生的。物光束中 S 是狭缝, 它起到限制点基元全息图 w_H 的作用。由于再现像主要受干板角度选择性的限制, 像的扩展是有限的; 为了能够观察到原参考光方向再现的全视场正视全息像, 记录时使狭缝 S 经透镜 L_1 成实像 S' , 即使成像光束有一出瞳。干板放在物像 O' 附近。

实验采用天津 I 型干板, 并且 $w = 8 \text{ mm}$, $z_s = z_E = 500 \text{ mm}$, $z_0 = 10 \text{ mm}$, $\theta_R = \theta_C = 30^\circ$, $\Delta \theta_R = 20^\circ$, 透镜 L_1 的焦距为 180 mm , 孔径为 100 mm , 从而可算出 $w_H = 0.16 \text{ mm}$, $\Delta x_i = 0.16 \text{ mm}$; 消色像域 $\Delta x_{I_{消色}} = 2.90 \text{ mm}$ 。

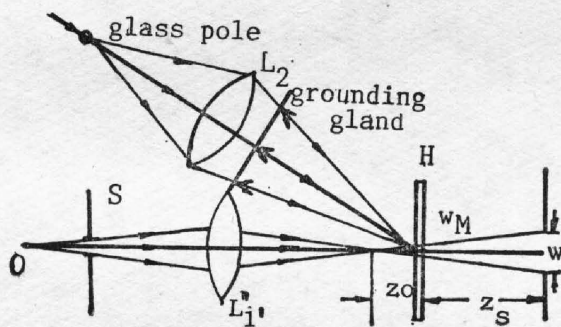


Fig. 7 Experimental diagram



Fig. 8 The achromatic image of an eyepiece

图 8 是所拍摄的消色像全息图(彩色)照片, 由于拍照时像机的距离及光阑大小与人眼直接观察时的条件均不一样, 从而图 8 中的像还未完全消色, 但已与彩虹全息有着明显的区别。实际用人眼看到的消色像黑白分明, 远比彩虹全息像更接近于真实物体, 并具有相当高的分辨率, 例如, 旋钮上的白色刻线历历在目。

五、小 结

(1) 对于所有的透射式的白光全息图, 由于点基元全息图尺寸和人眼瞳孔对成像光束的限制, 人眼所能看到的像扩展(像的分辨率)与光源的光谱展宽和空间展宽无关。本文明确提出人眼所能观察到的像点扩展与像点本身的扩展是完全不同的两个概念。

(2) 对于点光源记录的全息图(像面全息图, 彩虹全息图), 像点的扩展主要取决于像点

随波长的变化,在像点的扩展范围内不存在消色像域,从而再现像总有一波长范围。

(3) 消色像全息图,由于记录时采用了散射线光源作参考光,在像的扩展范围内存在一消色像域,从而可以再现出包含全波段像点的消色全息像。由于受到线光源散射程度以及再现像角度选择性的限制,消色像的观察范围也受到限制。

(4) 由于本文无论从基本原理还是从实验技术上都不同于现有的白光全息术,展示了一种实现白光显示的新途径,同时,由于这种新技术可以实现黑白全息照像,比单色像更能逼真地反映物体的真实情况,因此,具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] C. B. Burckhardt; *Bell. Syst. Tech. J.*, 1966, **45**, No. 10 (Dec), 1841~1844.
- [2] D. J. DeBitetto; *Appl. Phys. Lett.*, 1963, **9**, No. 12 (Dec), 417~418.
- [3] P. G. Boj *et al.*; *Appl. Opt.*, 1986, **25**, No. 22 (Nov), 4146~4149.
- [4] E. N. Leith *et al.*; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 20 (Oct), 3187~3188.
- [5] 蔡履中,张幼文;《光学学报》,1987, **7**, No. 8 (Aug), 721~727.
- [6] 于美文等;《光学全息及光信息处理》,(国防工业出版社,北京,1984), 20。

A new achromatic image holography

FAN CHENG AND YU MEIWEN

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

(Received 20 January 1988; revised 20 April 1988)

Abstract

Based on the relationship between object and image in the holography, variations of image position with both expandings of wavelength and reference source are discussed in detail. The idea presented in this paper is that images of whole visible light can be overlapped to generate an achromatic image by making use of the one-dimensional diffused reference beam. The achromatic image range is defined. Having considered the restriction of the elementary hologram and pupil of the eye to imaging beams, the high-quality achromatic image can be observed.

Key words: diffused linear light source; achromatic image range; expandings of the image point.