

# 大景深全息图的拍摄\*

葛万福 熊秉衡

(长沙铁道学院激光研究室)

## 提 要

本文利用激光的时间相干性对光程差的准周期性特点,采用光程差为腔长的偶数倍的物光照明以获得大景深全息图的拍摄,用普通的一米腔长的 He-Ne 激光器成功地拍摄了面积 5 m<sup>2</sup>, 景深 8.2 m 的全息图,为全息技术在使用普通市售激光器情况下应用于工程技术拍摄大型结构开辟了很好的远景。

## 一、引 言

全息图的景深和被摄物体的面积通常被限制在光源的相干长度之内,也可用光程补偿的方法扩展景深,但一般只能将景深扩展到激光器相干长度的 1~2 倍。

当以能见度允许的条件来定义相干长度,即以

$$|\gamma(l_c)| \stackrel{\text{def}}{=} 1/\sqrt{2} \approx 0.707, \quad (1)$$

式未定义相干长度  $l_c$  时<sup>[1]</sup>, 对于常用的 He-Ne 激光器而言,其相干长度约为几十厘米的量级,式中  $\gamma(l_c)$  为复自相干度。因此,通常拍摄大景深、大面积的全息图都不用 He-Ne 激光器,而采用经过选模的大功率氩离子激光器或大能量的红宝石激光器,它们的相干长度可达 1 m 以上,甚至可达 10 m 左右。Gates 曾用 10 J 输出的红宝石激光器在现场条件下拍摄了 6 m<sup>3</sup> 体积的工程结构<sup>[2]</sup>。显然,用这样的激光器来拍摄大景深、大面积全息图付出的代价是昂贵的。

为了能采用价格较低廉的普通 He-Ne 激光器来拍摄大景深、大物体的全息图,我们利用激光器时间相干性的一些特点,采用了光程差为偶数倍腔长的物光照明进行了一些基本实验,获得了满意的结果。

## 二、原 理

用作全息照相的激光光源通常工作在单一的、最低阶的空间模式 (TEM<sub>00</sub> 模) 状态,其时往往伴有较多的纵模,影响了它的时间相干性。

设多纵模强度相等,每个纵模都具有高斯线形并具有相等的间距,则具有不同纵模的激光光源的频谱密度可表示如下<sup>[3]</sup>

收稿日期: 1984 年 11 月 27 日; 收到修改稿日期: 1985 年 1 月 22 日

\* 本文曾在 1984 年 10 月于北京举行的全国首届全息技术学术会议上宣读过。

$$\begin{aligned}
\text{单纵模: } I_1(\nu) &= \delta(\nu - \bar{\nu}) \otimes G(\nu), \\
\text{双纵模: } I_2(\nu) &= \left[ \delta\left(\nu - \bar{\nu} - \frac{\Delta\nu}{2}\right) + \delta\left(\nu - \bar{\nu} + \frac{\Delta\nu}{2}\right) \right] \otimes G(\nu), \\
\text{三纵模: } I_3(\nu) &= [\delta(\nu - \bar{\nu} - \Delta\nu) + \delta(\nu - \bar{\nu}) + \delta(\nu - \bar{\nu} + \Delta\nu)] \otimes G(\nu), \\
\text{四纵模: } I_4(\nu) &= \left[ \delta\left(\nu - \bar{\nu} - \frac{3\Delta\nu}{2}\right) + \delta\left(\nu - \bar{\nu} - \frac{\Delta\nu}{2}\right) \right. \\
&\quad \left. + \delta\left(\nu - \bar{\nu} + \frac{\Delta\nu}{2}\right) + \delta\left(\nu - \bar{\nu} + \frac{3\Delta\nu}{2}\right) \right] \otimes G(\nu), \\
\text{五纵模: } I_5(\nu) &= [\delta(\nu - \bar{\nu} - 2\Delta\nu) + \delta(\nu - \bar{\nu} - \Delta\nu) + \delta(\nu - \bar{\nu}) \\
&\quad + \delta(\nu - \bar{\nu} + \Delta\nu) + \delta(\nu - \bar{\nu} + 2\Delta\nu)] \otimes G(\nu), \\
\text{六纵模: } I_6(\nu) &= \left[ \delta\left(\nu - \bar{\nu} - \frac{5\Delta\nu}{2}\right) + \delta\left(\nu - \bar{\nu} - \frac{3\Delta\nu}{2}\right) + \delta\left(\nu - \bar{\nu} - \frac{\Delta\nu}{2}\right) + \delta\left(\nu - \bar{\nu} + \frac{\Delta\nu}{2}\right) \right. \\
&\quad \left. + \delta\left(\nu - \bar{\nu} + \frac{3\Delta\nu}{2}\right) + \delta\left(\nu - \bar{\nu} + \frac{5\Delta\nu}{2}\right) \right] \otimes G(\nu), \\
&\dots\dots\dots
\end{aligned} \tag{2}$$

式中  $I_N(\nu)$  表示具有  $N$  条谱线(即  $N$  个振荡模式)的激光光源的频率谱密度, 式中  $\bar{\nu}$  为中心频率,  $L$  为腔长,  $\Delta\nu = (c/2L)$  为纵模间距,  $\delta\nu$  为频带宽。函数  $G(\nu)$  为

$$G(\nu) = \exp\left[-\left(\frac{2\sqrt{\ln 2}\nu}{\delta\nu}\right)^2\right] 2\sqrt{\ln 2}/(\sqrt{\pi}\delta\nu). \tag{3}$$

根据 Wiener-Kinchin 定理, 自相干函数  $\Gamma(\tau)$  与功率谱密度  $I(\nu)$  是傅里叶变换对, 即

$$\Gamma(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\nu) \exp[-i2\pi\nu\tau] d\nu, \tag{4}$$

$$\gamma(\tau) = \Gamma(\tau)/\Gamma(0), \tag{5}$$

将(2)式代入(4)式, 并根据(5)式, 以光程差  $l (= \tau c)$  作为自变量给出  $N=1, 2, \dots, 6$  的多纵模激光光源的复自相干度如下

$$\begin{aligned}
\text{单纵模: } \gamma_1(l) &= AB, \\
\text{双纵模: } \gamma_2(l) &= AB \cos(E/2), \\
\text{三纵模: } \gamma_3(l) &= AB(1/3)(1 + 2 \cos E), \\
\text{四纵模: } \gamma_4(l) &= AB(1/2) [\cos(E/2) + \cos(3E/2)], \\
\text{五纵模: } \gamma_5(l) &= AB(1/5)(1 + 2 \cos E + 2 \cos 2E), \\
\text{六纵模: } \gamma_6(l) &= AB(1/3) [\cos(E/2) + \cos(3E/2) + \cos(5E/2)],
\end{aligned} \tag{6}$$

式中  $A = \exp[-i2\pi\bar{\nu}l/c]$ ,  $B = \exp[-(\pi l \delta\nu / 2\sqrt{\ln 2} c)^2]$ ,  $E = \pi l/L$ 。当程差  $l$  为腔长  $L$  的偶数倍时

$$|\gamma(2mL)| = B = \exp[-(2mL\pi\delta\nu/2\sqrt{\ln 2} c)^2], \quad (m=0, 1, 2, \dots) \tag{7}$$

对 He-Ne 激光器, 因子  $B$  是一个随  $l=2mL$  缓缓作指数下降的函数。因此, 当程差为  $l=2L, 4L, 6L, \dots$  时, 复自相干度的模仍接近于 1。

图 1 表示了程差和复自相干度的模的关系, 画出了纵模数为 2、3 和 6 的曲线。

为了获得高质量的全息图, 首先必须使参考光、物光在全息干版位置处形成清晰的干

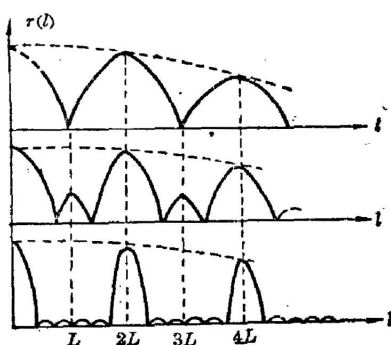


图 1

涉条纹, 由于条纹能见度与复自相干度的模成正比, (当相干的两束光振幅相等时, 两者数值相等), 因此图1也反映了能见度与程差的关系。显然, 当程差为腔长的偶数倍时, 在这些位置附近有极好的能见度。

利用激光器的上述特点, 根据被摄物体的分布位置及方位的不同, 采取不同光程的物光照明, 使之与参考光的程差保持为不同偶数倍腔长。用这种方法就可以获得景深很大的高质量的全息照片。

### 三、实 验

根据上述原理, 我们进行了以下实验, 拍摄了两张透射式全息图。

所用光源为北京大学生产的NH120型He-Ne激光器, 腔长1.2m, 输出TEM<sub>00</sub>模, 相干长度[按(1)式定义]实测约为20cm, 稳定性 $< \pm 3\%$ , 输出功率34mW。

拍摄的第一张全息图是路轨上的蒸汽机车模型, 机车长2.3m, 轨边和路基台座长4.5m, 前景放置一放大镜L<sub>0</sub>及一块标牌P(上面写有小字), 光路布局如图2所示。图中BS<sub>1</sub>、BS<sub>2</sub>、BS<sub>3</sub>为楔形分束镜, M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>为全反镜, L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>4</sub>、L<sub>5</sub>为扩束透镜, SF为针孔滤波器, 各束照明光在分束器后的功率分别为: 参考光R为6mW, 照明物光O<sub>1</sub>为15mW, O<sub>2</sub>为6mW, O<sub>3</sub>为1.2mW, O<sub>4</sub>为2mW, O<sub>5</sub>为1.2mW。其中O<sub>1</sub>、O<sub>2</sub>为主体物光, O<sub>3</sub>、O<sub>5</sub>为远景物光, O<sub>4</sub>为近景物光, 物光与参考光最大光程差为4.8m, 光程差变化范围为4.6m至5m, 最大景深为5m。

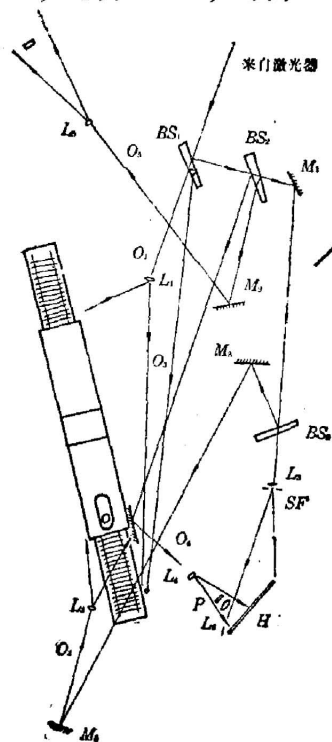


图 2

另一张全息图为一组分布在空间距离干版不同深度的几何体, 它们被照明的中心位置与参考光中心的光程差分别为0、2.4、4.8、7.2、9.6和12m, 光程差变化范围分别为40cm, 其光路布局如图3所示。

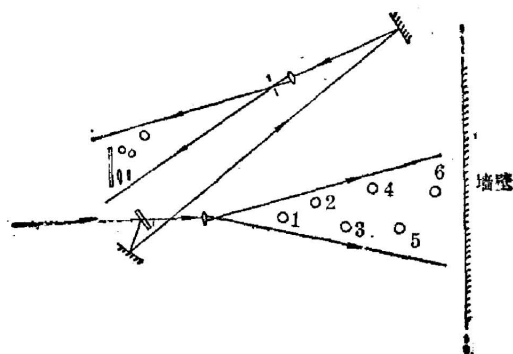


图 3

实验所用干版是天津感光胶像厂生产的全息 I 型干版, 曝光时间 20~30 sec, D76 硬性显影液显影,  $F_6$  定影。

图 4(a)、(b)、(c) 是第一幅全息图的再现虚像的 3 幅普通照片, 其中 (a)、(b) 是从同一角度拍摄的, 不同的是图 4(a) 是相机对机车聚焦拍摄的, 故前景不清晰。图 4(b) 是对前景写有小字的标牌聚焦的, 故远景不清晰, 图 4(c) 变换了一个角度, 这时标牌位于放大镜的后方, 故可以看到标牌上被放大的小字。

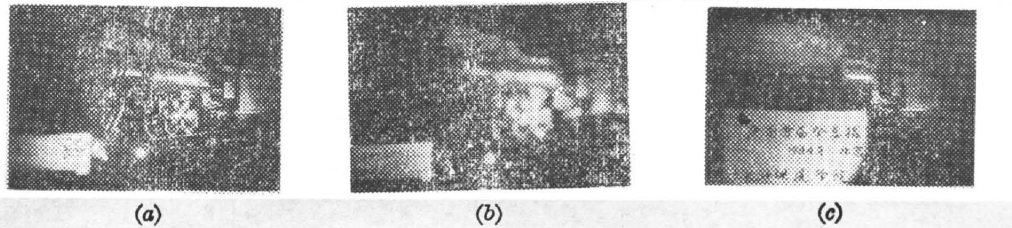


图 4

图 5 是第二幅全息图再现虚像的 4 幅普通照片, 其中 (a)、(b) 两幅拍摄角度同一。图 5(a) 对前景聚焦, 而图 5(b) 是对远景聚焦, 这时, 远处的碘钨灯支架、实验室墙壁、壁上的开关板和紧贴墙壁放置的一个镜圈都清晰可见, 图 5(c) 是通过放大镜观察后面标牌的镜头, 图 5(d) 是对中景聚焦, 这时, 右侧的一个小球是清晰的, 中间是放大镜, 因镜后是远物, 故看上去模糊不清, 但再取一透镜作目镜, 调节目镜的距离便可作为望远镜而观看远物。



图 5

#### 四、结 束 语

实验表明, 用普通的 He-Ne 激光器拍摄大景深、大物体的全息图是可行的。不过, 根据我们的实践经验, 拍摄时要特别注意每束物光中心与参考光的程差必须严格控制在腔长的偶数倍。由于 He-Ne 激光器功率较低, 拍摄面积越大, 曝光时间要求越长。因而拍摄时, 必须特别注意防震措施。例如, 对光路中的每个元件可以分别垫以金属块以增大其惯性, 并垫橡皮以隔震, 且最好在夜间拍摄。

用此法拍摄不连续的分立的物体群最为方便, 只要把被拍摄的每个物体分别安把在参、物光程差为腔长的偶数倍位置处, 每个物体中心的前后距离的光程差之差不要超过激光器的相干长度即可。如果拍摄一个大物体(或连续分布的物体群)若大物体只有两个面被拍摄下来, 可以使这两个面分别处于等光程椭圆周界附近, 如在图 2(a) 中, 以分束器  $BS_1$  及干版  $H$  的中心为焦点, 通过反射镜  $M_1$  中心作一椭圆, 使物体的右侧表面处于椭圆周界附近, 注意调整被摄物或镜子的位置, 使光程差限制在激光器相干长度之内, 对于本实验拍摄的物体

而言,两束物光  $O_1$ 、 $O_2$  已足够了。但物体更大、更长或表面纵深超过了相干长度时,则可采取多束物光分区照明,互相衔接,这是拍摄大型工程结构需要采取的方法。当被摄物体过大、过长,激光器的输出功率不能足以提供充分照明时,可利用玻璃微珠的回向反射效应,在被摄物体上涂敷适当折射率的玻璃微珠,以保证物光在干版上有足够的照度。

### 参 考 文 献

- [1] R. J. Collier; C. B. Burckhardt *et al.*; «*Optical Holography*», (Academic Press, 1971), 143.
- [2] J. W. Gates; *J. Scient. Instrum.*, 1968, 1, 989.
- [3] H. M. Smith; «*全息学原理*», (科学出版社, 1972), 140
- [4] 熊秉衡, 葛万福; «*长沙铁道学院学报*», 1984, No. 4 (Dec), 47.

## The method for making a holograms of great depth

GE WANFU AND XIONG PENGHEN

(*Laser Laboratory, Changsha Railway Institute, Changsha*)

(Received 27 November 1984; revised 22 January 1985)

### Abstract

This paper discusses a method for making a holograms of great depth by using multi-beam objective waves with path differences of even multiples of cavity length. A commercial He-Ne laser with cavity length of one meter was used to produce a hologram of 8.2m depth and 5m<sup>2</sup> area. This method may open a promising prospect for holographic recording of large engineering structures with commercial lasers.