

同时获得高亮度检测场和高衬比条纹的 实时全息记录方法

熊秉衡 张永安 王正荣 余灿麟

(云南工业大学激光研究所, 昆明 650051)

吕晓旭

(云南工业大学物理实验室, 昆明 650051)

摘 要 讨论了实时全息法应用于检测透明物体的情况下获得高衍射效率和高衬比条纹的若干问题。给出了同时获得高亮度检测场和高衬比条纹的最佳参数。在最佳光束比等于 1 和最佳相位调制度为 1.42 时, 衍射效率和光能利用率均可达到 29%。

关键词 实时全息法, 衍射效率, 条纹衬比度, 光束比, 相位调制度。

1 引 言

一些文献认为, 在实时全息法中, 参物光束比 B 的最佳选择是 $B = 3^{1-3}$ 。因为在拍摄全息图时, 总是希望衍射效率尽可能高以便获得最亮的再现像。对薄相位型全息图而言, 最高的衍射效率约为 33.9%。这时, 衍射光的光强约为入射参考光光强的 1/3。若假定物光无衰减地透过全息图, 则在参物光束比为 $B = 3$ 的情况下, 参考光再现的物光(全息图的一级衍射)与物体通过全息图透射过来的物光光强接近相等, 接近最佳衬比, 即条纹衬比度 $V \approx 1$ 。然而, 实际情况是, 尽管这时物体的再现像(一级衍射光)最亮, 但透射物光却非常弱, 致使干涉条纹衬比度很低, 并不适合于干涉计量的要求。文献[4]提出了一种可获得高衬比条纹的实时全息记录方法, 指出在任何参物光束比的情况下都可以得到高衬比条纹。但未涉及怎样同时获得高亮度图像和高衬比条纹的问题。本文讨论了实时全息法应用于检测透明物体的情况下获得高衍射效率和高衬比条纹的若干问题, 给出了同时获得高亮度检测场和高衬比条纹所需的光束比及相位调制度。

2 最高衍射效率下的条纹衬比及检测场亮度

在实时全息法中, 若考虑沿物光方向传播的两项衍射光。其复振幅分布可分别表示为^[5]

$$U_R = K J_1(\alpha) R_0 \exp \{i[\phi(x, y) + \pi/2]\},$$

* 国家自然科学基金(46764010)及云南省自然科学基金(90F061)资助项目。

收稿日期: 1997-09-29; 收到修改稿日期: 1998-04-01

$$U_0 = K J_0(\alpha) O_0 \exp \{i[\Phi_0(x, y) + \Delta\Phi_0(x, y)]\} \quad (1)$$

式中 U_0 为物光照射在全息图上的零级衍射光, 也可看作是物光通过全息图的直透光的复振幅分布函数, U_R 为参考光照射在全息图上的一级衍射光的复振幅分布函数, R_0 为参考光复振幅分布函数之振幅, O_0 为物光复振幅分布函数之振幅, $J_0(\alpha)$ 为第一类零阶贝塞尔函数, $J_1(\alpha)$ 为第一类一阶贝塞尔函数, α 为相位调制度, Φ 为光扰动复振幅分布函数之相位, 下标为 O 者代表物光的复振幅分布函数之相位, 下标为 R 者代表参考光的复振幅分布函数之相位, K 为简化表达式而引入的量, 它等于 $b_i \exp(j\gamma E_0)$, 其中, γ 为曝光量常数, E_0 为平均曝光量。它们叠加后的光强分布为

$$I = |K|^2 \{ [J_1(\alpha) R_0]^2 + [J_0(\alpha) O_0]^2 + 2R_0 O_0 J_1(\alpha) J_0(\alpha) \cos [\Delta\Phi_0(x, y) - \pi/2] \} \quad (2)$$

根据条纹衬比度的定义, $V \equiv (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 。此两项衍射光场的条纹衬比度为:

$$V = 2R_0 O_0 J_0 J_1 / [(J_1 R_0)^2 + (J_0 O_0)^2] = 2(J_1/J_0) B^{1/2} / [1 + (J_1/J_0)^2 B] \quad (3)$$

2.1 光束比取 $B = 3$

先考虑衍射效率最高时光束比取 $B = 3$ 的情况。此时, $\eta_{\max} \approx 33.4\%$, $\alpha \approx 1.82$ (η 为衍射效率)。于是, 查表 1 可得 $[J_1(1.82)/J_0(1.82)]^2 \approx 3$ 。将此结果和 $B = 3$ 代入(3)式, 可得到其相应的条纹衬比度 $V \approx 60\%$ 。也就是说, 这种情况下虽然衍射光亮度高, 但条纹衬比度却很低, 并不宜于检测的要求。实际上, 在此情况下, 再现时沿物光方向传播的两项衍射光的光强比 $B' = |U_R|^2 / |U_0|^2 = B [J_1(\alpha) / J_0(\alpha)]^2 \approx 9$ 。两束光光强相差太大。直接根据表达式 $V = 2B^{1/2} / (1 + B)$ 计算条纹衬比度, 也立即可得 $V = 0.6$ 。

Table 1. Relationship of $J_0^2(\alpha)$ 、 $J_1^2(\alpha)$ 、 $[J_0^2(\alpha)/J_1^2(\alpha)]$ and phase modulation α

α	$J_0^2(\alpha)$	$J_1^2(\alpha)$	$J_0^2(\alpha)/J_1^2(\alpha)$	α	$J_0^2(\alpha)$	$J_1^2(\alpha)$	$J_0^2(\alpha)/J_1^2(\alpha)$
0.1	0.9950	0.0025	398.0	1.3	0.3845	0.2725	1.411
0.2	0.9801	0.0099	99.00	1.4	0.3214	0.2933	1.096
0.3	0.9557	0.0220	43.44	1.5	0.2619	0.3113	0.8416
0.4	0.9224	0.0384	24.01	1.6	0.2074	0.3284	0.6385
0.5	0.8808	0.0587	15.00	1.7	0.1584	0.3339	0.4745
0.6	0.8317	0.0822	10.12	1.8	0.1156	0.3381	0.3419
0.7	0.7765	0.1082	7.174	1.9	0.0794	0.3378	0.2350
0.8	0.7162	0.1360	5.266	2.0	0.0501	0.3326	0.1506
0.9	0.6521	0.1648	3.958	2.1	0.0278	0.3230	0.0859
1.0	0.5855	0.1937	3.023	2.2	0.0122	0.3091	0.03943
1.1	0.5178	0.2218	2.335	2.3	0.0031	0.2915	0.01057
1.2	0.4504	0.2483	1.814	2.4	0.000006	0.2706	0.00002

2.2 光束比取 $B = 1/3$

在衍射效率最大值条件下, 光束比 $B = 3$ 并不可取, 原因是条纹衬比度很低。那么, 是否可在衍射效率最大条件下, 同时获得最佳的条纹衬比度呢? 这当然也能做到。根据文献[4]的方法, 对(3)式求导, 当 $V' = (J_1/J_0) B^{-1/2} [1 - (J_1/J_0)^2 B] / [1 + (J_1/J_0)^2 B]^2 = 0$ 时, 亦即

$$B = [J_0(\alpha) / J_1(\alpha)]^2 \quad (4)$$

时, 衬比度将达到最大值 $V = V_{\max} = 1$ 。这就是说, 需根据(4)式来重新选择光束比 B 。在全息图的衍射效率最大值条件下, 相位调制度应取 $\alpha \approx 1.82$ 。于是, $B = [J_0(\alpha) / J_1(\alpha)]^2 \approx 1/3$ 。在此情况下, 再现时沿物光方向传播的两项衍射光的光强比 $B' = |U_R|^2 / |U_0|^2 =$

$B[J_1(\alpha)/J_0(\alpha)]^2 \approx (1/3) \times 3 = 1$ 。相应的条纹衬比度 V 也就达到了最大值。或者, 直接将上述数据代入(3)式, 也可得 $V = V_{\max} = 1$ 。这时, 衍射效率和条纹衬比度均达到了最大值, 也就是说, 全息图既有最亮的再现像, 而且, 图像上的干涉条纹也有最佳的衬比度。然而, 还不能认为这就是实时全息方法用于检测透明物体的最佳选择。因为, 这时光场的亮度却并非最佳。对于实时全息检测的有效光场而言, 其平均光强是一级衍射光的平均光强与直透物光的平均光强两者之和。所以, 单单只考虑衍射效率就不够了, 还必须同时考虑两者的综合影响。也就是要考虑在一定的照明光强下, 既能获得有效光场最高的亮度, 又同时获得最佳的条纹衬比度, 这才是实时全息术的最佳选择。作为检测用的有效光平均光强 $I_{\text{eff}} = |U_R|^2 + |U_O|^2$, 入射在全息图上的平均光强 $I = |R_O|^2 + |O_O|^2$ 。为了定量评价光能的利用效率, 引入光能利用率 S 描述此性质。它的定义是: 形成干涉图纹的有效光平均光强 I_{eff} 与入射在全息图上的平均光强 I 之比, 即

$$S \equiv (I_{\text{eff}}/I) = |K|^2 [BJ_1^2(\alpha) + J_0^2(\alpha)] / (B + 1) \quad (5)$$

当衍射效率最高, 相位调制度取 $\alpha \approx 1.82$ 的情况下, 若不考虑其他损失, 假定 $|K| = 1$ 时, 根据(5)式, 有 $S \approx 17\%$ 。这表明: 在衍射效率取最大值时, 如同时还要兼顾条纹衬比度最大, 那么这时的光能的利用率还并不很高。在实时全息检测中还不能认为是最佳的选择。

3 同时获得高亮度检测场和高衬比条纹的条件

考虑光能利用率获最大值的条件, 对(5)式求导可得

$$S' = |K|^2 [J_1^2(\alpha) - J_0^2(\alpha)] / (1 + B)^2 \quad (6)$$

即当 $S' = 0$ 时, 也就是 $J_1^2(\alpha) = J_0^2(\alpha) \approx 0.29$ 或 $\alpha = 1.42$ 时, 光能利用率 S 取最大值 S_{\max}

$$S = S_{\max} = |K|^2 J_0^2(\alpha) \approx 0.29 |K|^2 \quad (7)$$

不考虑其他损失, 假定 $|K| = 1$ 时, 有 $S \approx 29\%$ 。这时全息图的衍射效率是 $\eta = |K|^2 J_1^2(\alpha) \approx 29\%$ 。为了同时获得最佳的条纹衬比度, 根据(4)式有 $B = 1$ 。

这时, 虽然衍射效率并非最高, 但有效光场即检测光场的亮度却最高, 光能利用率最大, 并同时具有最佳的条纹衬比度。它说明了, 对于实时全息检测的有效光场而言, 不仅要考虑衍射光的亮度, 还同时要考虑直透物光的亮度。亦即同时考虑两者之综合影响。结论是: 在一定的照明光强下, 能获得检测光场最高亮度和干涉条纹最佳衬比度的最佳选择是光束比取 $B = 1$, 相位调制度取 $\alpha = 1.42$ 。

4 实践中应注意的事项

本实验提出了一种获得高反衬度干涉条纹的实时全息记录和控制相位调制度的方法^[4-6], 并将这些方法成功地应用于透明物体的检测和燃烧场的诊断等方面。为了提高所获数据的时间分辨率, 进一步研究了如何有效利用光能的问题。从前面的理论分析找到了实时全息中最佳的检测条件。两年多来的实践表明, 以上理论与实验符合甚好。下面, 以三次较为典型的实验结果为例作一些说明(如表2所示)。

在实验1中, 平均光束比取 $B \approx 3$, 平均相位调制度取 $\bar{\alpha} \approx 1.82$ 时, 虽然衍射效率和光能的利用率都很高, 但一级衍射光与直透物光的光束比太大, 约10倍多, 条纹衬比度太低, 只有57.4%, 并不适用。在实验2中, 平均光束比取 $B \approx 1/3$, 平均相位调制度取 $\bar{\alpha} \approx 1.82$ 时,

Table 2. Results of phase modulation, contrast and efficiencies run at different beam ratio

experiment	1	2	3
average beam ratio \bar{B}	3.34	0.299	1.04
average phase modulation $\bar{\alpha}$	1.80	1.85	1.43
average diffraction efficiency $\bar{\eta}/\%$	37.5	35.4	25.5
average fringe contrast \bar{V}	57.4	98.6	99.0
average light energy efficiency $\bar{S}/\%$	31.7	16.1	26.0

一级衍射光与直透物光的光束比接近于 1, 可以获得很高的条纹衬比度。但光能利用率低, 只有 16.1%。通常, 在激光光源功率和记录材料灵敏度都较高的情况下, 还是可以满足实验要求的。然而, 在某些情况下, 例如, 在一定激光光源功率给定限制条件下, 记录材料灵敏度不够高或欲使记录信息有尽可能高的时间分辨率时, 就必需进一步考虑光能的利用率问题。在实验 3, 平均光束比取 $\bar{B} \approx 1$, 平均相位调制度取 $\bar{\alpha} \approx 1.42$ 时, 既获得了高衬比度的干涉条纹, 又获得了高亮度的有效检测场, 光能的利用率达到了 26%。这种方法是使用实时全息法检测透明体的最佳选择。由于使用了这种方法, 本实验用功率输出仅 30 mW 的氦氖激光器, 就可以用具有连拍功能的 35 mm 相机和 CCD 摄像机记录下快门速度为 1/4000 秒的瞬态现象^[6]。而且图像清晰、条纹反衬度高。若使用高速摄影机, 还可记录下更高速度的变化过程。

实验还表明: 当曝光量和调制度较低(调制度低于 1.4)时, 实际的衍射效率和光能的利用率比理论值低一些(约低 10% 左右)。这是主要是由于记录材料界面的反射和吸收所致。当曝光量和调制度较高(调制度高于 1.7 以上)时, 实际的衍射效率比理论值要高, 这是由于乳剂的体积效应所致。它不仅弥补了反射和吸收带来的损失, 还使实际的衍射效率比薄相位全息图的理论值要高出约 10% 左右。在曝光量强、调制度高时乳剂的体积效应尤为显著。尽管出现上述现象, 这时的光能利用率和条纹衬比度仍与理论值相近, 并略低于理论值(约低 5% 左右)。实验充分说明: 在光束比 $\bar{B} \approx 1$, 调制度 $\bar{\alpha} \approx 1.42$ 的情况下, 实时全息图具有最佳的光能利用率和条纹衬比度。

在采用卤化银乳胶时, 为了保证在特性曲线的线性区进行记录, 需避开曲线的趾部, 故光束比应略大于 1, 通常可取 $B = 1.1 \sim 1.2$ 。不过, 在实际工作中, 光场一般不会是绝对均匀的。常取光场的中心部分 $B = 1$ 。这时光场的其余部分就不再等于 1。而是 1.1、1.2 或 0.9、0.8 等其他偏离 1.0 的不大之值。而整个光场的平均值 $\bar{B} \approx 1.0$ 。这时, 记录材料上虽有很小部分局域处于特性曲线的趾部, 但其它大部份区域均处于线性区。

实时全息术用于检测透明物体时, 通常有两种做法。一是将待测透明物体放入物光光路上拍摄实时全息图; 二是拍摄实时全息图时, 待测透明物体并不放入物光光路。而是在拍摄并处理好实时全息图之后再待测透明物体放入物光光路上进行检测。对后者而言, 相当于拍摄全息光栅。对前者而言, 如果物体散射性能很弱, 也近似相当于拍摄全息光栅。在光束比 $B = 1$ 的情况下, 两束光是对等的。透明物体无论放在哪一束光束中都一样。为了同时获得高亮度图像和高衬比干涉条纹的实时全息图, 具体的实验步骤可分以下四步^[5]:

第一步, 取平均光束比 $\bar{B} \approx 1$, 以曝光时间 t_1 拍摄第一张实时全息图 H_1 ;

第二步, 照明再现这张实时全息图 H_1 用文献[5]的方法测出其平均相位调制度 $\bar{\alpha}_1$;

第三步, 根据文献[5]中的公式 $t_{opt} = (\bar{\alpha}_{exp}/\bar{\alpha}_1) t_1$ 计算最佳曝光时间 t_{opt} (注意: 这时 $\bar{\alpha}_{exp} \approx 1.42$);

第四步,除曝光时间外,保持实验条件与拍摄第一张实时全息图时的相同(即保持激光功率、光路、光束比、化学处理条件、温度不变,……),以最佳曝光时间 t_{opt} 拍摄第二张实时全息图 H_2 。

结束语 为在实时全息术中获得最好的检测效果,必须: 1) 干涉条纹具有最佳的衬比度; 2) 在一定光强的入射光下,检测光场具有最高亮度。本文根据薄相位型全息图理论导出在实时全息术检测透明物体时可同时获得高衬比度干涉条纹和高亮度检测光场的条件: 选取光束比为 1:1, 相位调制度 $\alpha = 1.42$ 的拍摄参数时,可获得最好的结果。此时可达到的衬比度理论值为 $V = 1$, 衍射效率的理论值为 $\eta = 29\%$, 相应的光能利用率的理论值也为 $S = 29\%$ 。尽管由于记录材料界面的反射和吸收以及乳胶的体积效应等因素使得在实际工作中,实时全息图平均调制度在 $\bar{\alpha} \approx 1.42$ 时,其平均衍射效率和平均光能的利用率比理论值低一些;而调制度在 $\bar{\alpha} \approx 1.82$ 时,实际的衍射效率比理论值要高一些,但其条纹衬比度和光能的利用率仍与理论值相近,并略低于理论值。在综合考虑实时全息的条纹衬比度和光能的利用率的情况下,实验证实:以光束比 $B \approx 1$, 调制度 $\bar{\alpha} \approx 1.42$ 时效果最佳。此参数是使用实时全息法检测透明体的最佳选择。

参 考 文 献

- [1] 于美文. 光学全息及信息处理. 北京: 国防工业出版社, 1984. 176~ 177
- [2] 朱德忠. 热物理激光测试技术. 北京: 科学出版社, 1990. 137~ 144
- [3] 于美文. 光全息学及其应用. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 391~ 393
- [4] 熊秉衡, 王正荣, 张永安等. 可获得高反衬度干涉条纹的实时全息记录方法. 光子学报, 1996, 25(8): 707~ 712
- [5] 熊秉衡, 王正荣, 张永安等. 制作具有预期位相调制度的卤化银乳胶位相型薄全息光栅的研究. 光学学报, 1997, 17(8): 1021~ 1027
- [6] 熊秉衡, 王正荣, 张永安等. 用实时全息术研究低速变化过程的一种简易系统. 光学学报, 1997, 17(5): 572 ~ 576

A Real-Time Hologram Recording Method for Obtaining High Brightness of the Testing Optical Field and High Contrast of the Fringes

Xiong Bingheng Zhang Yong'an Wang Zhengrong She Canlin
(Laser Institute of Yunnan Polytechnic University, Kunming 650051)

Lu Xiaoxu

(Physical Laboratory of Yunnan Polytechnic University, Kunming 650051)

(Received 29 September 1997; revised 1 April 1998)

Abstract Some problems on obtaining high efficiency of diffraction and high contrast of interference fringes in real-time holographic interferometry are discussed. The optimum beam ratio and the optimum phase modulation for obtaining high brightness of the testing optical field and high contrast of the interference fringes in real-time holographic interferometry are presented. Both of the diffraction efficiency and the light energy efficiency can be reached to 29% in case of that the optimum beam ratio is 1 and the optimum phase modulation is 1.42.

Key words real-time holographic interferometry, diffraction efficiency, contrast of fringes, beam ratio, phase modulation.