

文章编号: 0253-2239(2007)12-2139-4

# 二步法大景深反射全息图

梁桂荣 陶纯匡

(重庆大学数理学院, 重庆 400030)

**摘要:** 以开拓反射全息图的景深表达能力为目的,从反射全息图的共轭物像关系出发,利用反射全息图的均匀介质耦合波理论和布拉格条件,对其白光再现像模糊作了具体的分析和讨论,得到色模糊和线模糊的表达式。指出反射全息图上不同各点对任意白光再现像点的色模糊和线迷糊的影响均存在差异,给出反射全息图白光再现像的景深表达式。实验利用二步法制作了一张景深为 83 cm 的反射全息图,与大景深彩虹全息图再现像相比,其再现像的立体感更加强烈。理论分析和实验结果表明,光源的再现角度和观察距离对反射全息图的再现像景深大小影响显著。在再现光垂直于反射全息图平面照明情况下,反射全息图具有最好的景深表达能力。

**关键词:** 全息; 景深; 耦合波理论; 像模糊; 布拉格条件

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

## Two-Step Large Scene Reflection Holograms

Liang Guirong Tao Chunkuang

(College of Mathematic and Physics, Chongqing University, Chongqing 400030)

**Abstract:** To exploit the expressive ability of depth of field of reflection holograms according to the relationship between object and conjugate image, and using the uniform coupled-wave theory and the Bragg condition, the image blur of reflection hologram which was caused by reconstruction with white light source, was analyzed and discussed concretely, so the expressions of the color blur and linear blur were achieved. Such a difference was pointed out: when the reflection hologram was constructed by white light source, the color blurs and linear blurs caused by different dots on the reflection hologram, have different effects for the same construction image point. The expression about the depth of field of reflection hologram was advanced. A two-step large scene depth reflection hologram which is deep as 83 centimeters was obtained in experiment. Compared with large depth rainbow hologram, the three-dimensional effect of the reconstruction image is stronger. The theoretical analysis and the experimental result showed that, the depth of field of reflection hologram's reconstruction image will be affected markedly by reconstructing angle and the watching distance. When the reflection hologram was reconstructed vertically, it has the most ability to express its depth of field.

**Key words:** hologram; depth of field; coupled-wave theory; image blur; Bragg condition

## 1 引言

反射全息图对再现光波波长有很高的灵敏性<sup>[1,2]</sup>,一般情况下能获得很好的单色再现像。因而在讨论反射全息图的白光再现像时,往往把反射全息图看作半波堆滤波器而不考虑再现像模糊<sup>[3]</sup>。在拍摄目标物离记录介质表面很近或者紧贴介质表面的情况下,这种近似是足够的。但是,反射全息图的波长灵敏性是有限的。根据耦合波理论<sup>[4~7]</sup>,反射全息图对再现光波有一定的波长响应带宽<sup>[8]</sup>。虽然这种响应带宽很小,但在拍摄大景深目标物时,随着物与厚记录介质距离的增大,很小的带宽对再现

像模糊的影响势必会变得明显<sup>[9]</sup>。反射全息图作为一大类可白光显示全息图,全面探讨其景深问题,对开拓其白光显示能力和艺术价值,均有积极的意义。

## 2 反射全息图的像模糊

设 $(x_0, y_0, z_0)$ ,  $(x_R, y_R, z_R)$ 、 $(x_C, y_C, z_C)$ 和 $(x_1, y_1, z_1)$ 分别为反射全息图的物点、参考光源、再现光源和再现像点的坐标。记录介质处理前后厚度不变情况下,其物像关系与平面透射全息图物像关系相似<sup>[10]</sup>。根据二步法所得全息图的再现特点,考虑其共轭物像关系,有

作者简介: 梁桂荣(1979—),男,广东湛江人,硕士研究生,主要从事显示全息方面的研究。E-mail: liguro@126.com

导师简历: 陶纯匡(1946—),男,教授,主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: wangtao@cqu.edu.cn

收稿日期: 2007-02-02; 收到修改稿日期: 2007-05-28

$$z_1 = \frac{\lambda_0 z_0 z_R z_C}{-\lambda_0 z_0 z_R - \lambda z_R z_C - \lambda z_0 z_C}, \quad (1)$$

$$x_1 = \frac{\lambda_0 x_C z_R z_0 + \lambda x_0 z_R z_C + \lambda x_R z_C z_0}{-\lambda_0 z_0 z_R - \lambda z_R z_C - \lambda z_0 z_C}, \quad (2)$$

$$y_1 = \frac{\lambda_0 y_C z_R z_0 + \lambda y_0 z_R z_C + \lambda y_R z_C z_0}{-\lambda_0 z_0 z_R - \lambda z_R z_C - \lambda z_0 z_C}, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为满足布拉格条件入射的光波波长。

## 2.1 色模糊

反射全息图在白光再现时,由于它有一定的波长响应带宽而同样存在色模糊。在一般记录和再现条件下,容易满足

$$z_C, z_R \gg z_0, \quad (4)$$

由(1)式~(3)式,并考虑(4)式影响,求得再现像点色模糊为

$$\Delta z_{1\lambda} = \frac{\partial z_1}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{\lambda_0 z_0}{\lambda^2} \Delta \lambda, \quad (5)$$

$$\Delta x_{1\lambda} = \frac{\partial x_1}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{-\lambda_0 x_C z_0}{\lambda^2 z_C} \Delta \lambda, \quad (6)$$

$$\Delta y_{1\lambda} = \frac{\partial y_1}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{-\lambda_0 y_C z_0}{\lambda^2 z_C} \Delta \lambda, \quad (7)$$

式中  $\Delta \lambda$  为反射全息图在波长  $\lambda$  对应的布拉格条件再现下的波长响应带宽。全息图在记录和再现时,一般情况下有  $y_C = y_R = 0$ ,因而计算中对再现光源和像点在  $y$  方向的展宽不予考虑。

记录一般物信息的反射全息图相当于复杂的反射光栅。根据耦合波理论,反射全息图在白光再现时,任意再现像点均为全息图上对应的一系列倾斜和非倾斜反射光栅衍射和干涉的结果,而不同条件的反射光栅的响应波带宽是不同的。也就是说,反射全息图的任意再现像点的色模糊是反射全息图上的一系列不同的反射光栅共同影响的结果。

图 1 为反射全息图上任意点基元体全息图<sup>[7]</sup>的光栅结构和再现示意图。 $\mathbf{K}_C$ 、 $\mathbf{K}_I$  分别为再现光波和衍射光波在记录介质中的传播矢量, $\mathbf{K}_F$  为介质峰值面的传播矢量, $\mathbf{K}_C$ 、 $\mathbf{K}_I$  和  $\mathbf{K}_F$  与  $z$  轴的夹角分别为  $\psi$ 、 $\theta$  和  $\phi$ ,  $\theta_B$  为对应波长  $\lambda$  再现时的布拉格角。

考虑无吸收反射相位全息图,根据均匀介质耦合波理论,其衍射效率为<sup>[9]</sup>

$$\eta = \frac{\gamma^2 [\text{ch } 2(\gamma^2 - \chi^2) - 1]}{\gamma^2 [\text{ch } 2(\gamma^2 - \chi^2) + 1] - 2\chi^2}, \quad (8)$$

其中 
$$\chi = \frac{2\pi n_0 \sigma \cos^2[(\psi + \theta)/2]}{\lambda^2 \cos \theta} \delta \lambda, \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{\pi n_1 \sigma}{\lambda (\cos \psi \cos \theta)^{1/2}}, \quad (10)$$

式中  $\sigma$  为记录介质厚度,  $n_0$  为介质折射率,  $n_1$  为介质折射率变化值,  $\delta \lambda$  为对应的反射全息光栅波长灵敏

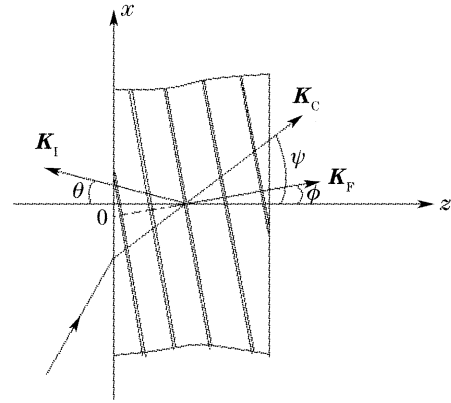


图 1 点基元体积全息图的光栅结构和再现示意图  
Fig. 1 The grating structure and reconstruction sketch of dot-element volume hologram

性。令  $\eta_0 = \eta|_{\chi=0}$ , 得到

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\gamma^2 [\text{ch } 2(\gamma^2 - \chi^2) - 1] (\text{ch } 2\gamma + 1)}{\{\gamma^2 [\text{ch } 2(\gamma^2 - \chi^2) + 1] - 2\chi^2\} (\text{ch } 2\gamma - 1)}. \quad (11)$$

根据文献[9],由  $\eta/\eta_0 \sim \chi$  曲线和(9)式,可求出不同条件下反射全息光栅的波长灵敏性。表 1 是在考虑  $n_0 = 1.5$ ,  $n_1 = 0.015$ ,  $\sigma = 15 \mu\text{m}$  和  $\lambda = \lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$  情况下,对应不同的  $(\psi, \theta)$  组值求得的带宽  $\Delta \lambda$  ( $\Delta \lambda = 2\delta \lambda$ , 单位: nm)。

表 1 布拉格条件再现下对应不同  $(\psi, \theta)$  组值的波长响应带宽  
Table 1 The response bandwidth of wavelength corresponding different group values  $(\psi, \theta)$  with reconstruction under the Bragg condition

$\Delta \lambda$ / $\psi$ / $\theta$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
$0^\circ$	18.89	19.05	19.55	20.42
$5^\circ$	18.86	19.16	19.82	20.87
$10^\circ$	18.76	19.21	20.03	21.27
$15^\circ$	18.57	19.20	20.17	21.61
$20^\circ$	18.37	19.11	20.25	21.88
$25^\circ$	18.08	18.95	20.25	22.10
$30^\circ$	17.68	18.71	20.17	22.22
$35^\circ$	17.22	18.37	19.99	22.25
$40^\circ$	16.66	17.94	19.71	22.16

表 1 说明,在反射全息图再现时,其波长灵敏性随参考光与全息图平面法线夹角  $\psi$  的增大而降低(即响应带宽变大);在垂直再现情况下,有相应的最小带宽。同时,在  $\psi$  一定时,离全息图中心较远点的波长灵敏性也较好。

## 2.2 线模糊

设再现光源在  $x$  和  $z$  方向有展宽,一般情况下  $z_R, z_C$  很大,此时可视  $\psi$  为定值,从而有

$$\tan \psi = x_C / z_C, \quad (12)$$

由反射全息图的布拉格条件和图 1 的几何关系,可得到

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{\cos[\psi - (\psi_0 - \theta_0)/2]}{\cos[(\psi_0 + \theta_0)/2]}, \quad (13)$$

式中  $\psi_0, \theta_0$  分别为原参考光再现时介质中再现光波和衍射光波传播矢量与  $z$  轴的夹角。联合(1)式、(2)式、(12)式和(13)式,并考虑(4)式,线模糊

$$\Delta z_{IC} = \frac{\partial z_1}{\partial \psi} \Delta \psi_z = -z_0 \cos[(\psi_0 + \theta_0)/2] \tan \varphi \sec \varphi \Delta \psi_z, \quad (14)$$

$$\Delta x_{IC} = \frac{\partial x_1}{\partial \psi} \Delta \psi_x = z_0 \cos[(\psi_0 + \theta_0)/2] \sec^2 \varphi (\sec^2 \psi \cos \varphi + \tan \psi \sin \varphi) \Delta \psi_x, \quad (15)$$

式中  $\varphi = \psi - (\psi_0 - \theta_0)/2$ 。

由(14)式、(15)式可看出,在再现光源的空间展宽一定的情况下,反射全息图再现像的线模糊与记录参量  $\psi_0$  和再现光的入射角度有关。同时,  $\theta_0$  的出现表明,反射全息图上不同点对同一再现像点的模糊影响也是不同的。再现单色像的色彩由(13)式确定。

### 3 反射全息图的景深

再现像点要能被人眼清晰分辨,其模糊量对人眼张角不能大于人眼的角分辨率<sup>[11]</sup>。考虑(6)式,有

$$|\Delta x_{ix}| \leq \alpha_E (\pm z_i + z_E), \quad (16)$$

式中  $\alpha$  为角分辨率,  $\alpha_E = 3 \times 10^{-4}$  rad,  $z_E$  为人眼离全息图的距离 ( $z_E > 0$ ), “ $\pm$ ” 分别对应再现像与人眼同侧和异侧的情况。

由(1)式、(6)式和(16)式,并考虑(4)式条件,容易得到反射全息图的景深表达式

$$\Delta z_0 = \frac{2\lambda^2 \alpha_E z_E}{|x_C/z_C| \lambda_0 \Delta \lambda - \alpha_E \lambda_0 \lambda}, \quad (17)$$

可见反射全息图的景深主要决定于参考光、再现光入射角度和观察距离  $z_E$ 。在  $z_E$  不变时,(17)式中因子  $x_C/z_C$  起主要作用。取  $z_E = 1000$  mm,  $\lambda = \lambda_0 =$

632.8 nm,  $\Delta \lambda = 20$  nm,  $(x_C, z_C)$  分别为 (500 mm, 5000 mm), (100 mm, 5000 mm) 时,分别算得景深为 21 cm, 180 cm。可见  $x_C/z_C$  越小,景深越大。

### 4 实验和结果

利用二步法拍摄了一张物体组景深为 83 cm 的反射全息图,拍摄步骤与二步法像全息基本相同,第一步用天津 I 型干板制作了景深为 83 cm(三个目标物,中间物近点离前物近点和远物远点分别为 51 cm 和 32 cm) 的菲涅耳全息图作为母片。第二步

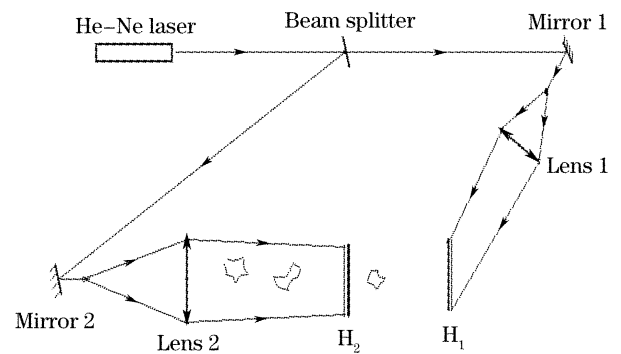


图 2 大景深反射全息图的记录光路

Fig. 2 Recording optical arrangement of large scene reflection hologram

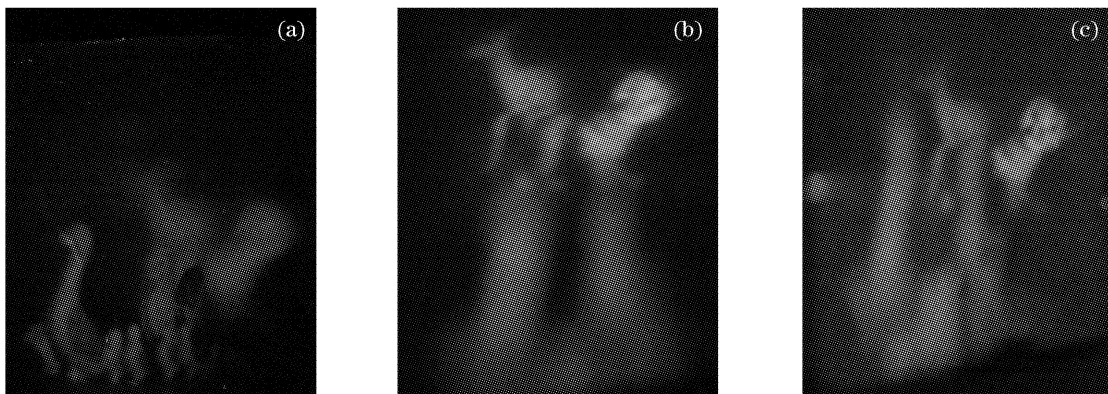


图 3 大景深反射全息图的再现像。(a)前物在焦点,(b)后物在焦点,(c)绿色再现像

Fig. 3 The reconstruction images of the large scene reflection hologram. (a) The frontal objects are at focus, (b) back objects are at focus, (c) the green reconstruction image

记录光路如图 2 所示,激光波长  $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$ ,  $H_1$  为母片,  $H_2$  为 HR-1 型厚干板(银盐干板),置于母片的共轭再现实像中间。稍会聚的参考光从  $H_2$  背面入射,与干板法线夹角约  $20^\circ$ 。全息干板经恰当曝光后采用文献[12]的后处理配方和工艺进行处理得到衍射效率很高的相位型反射全息图。

图 3(a)和图 3(b)是处理后的反射全息图在普通点状白光光源再现下拍摄的再现像,再现角度和记录角度基本相同。图 3(c)是调节再现角度和观察角度后拍摄得到的绿色再现像。

## 5 结 论

反射全息图的景深大小主要由它的波长灵敏性、记录和再现参量以及再现观察距离共同决定。记录参考光和再现光与记录介质平面法线的夹角越小,所得全息图的波长灵敏性最好,并且具有最大的景深表达能力;加大眼睛与全息图的距离,有利于对大景深再现像的观察。一般的反射全息图在白光再现时,其上各点对任意再现像点的模糊影响有差异。实验结果表明,在偏离原参考光布拉格条件再现反射全息图时,可得到不同单色的再现像,这是反射全息图的波长选择性的具体体现。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Jianhong, Chen Linsen. Rectangular band-pass reflection hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(5): 662~665 (in Chinese)  
吴建宏,陈林森. 矩形带通反射全息的实验研究[J]. 光学学报, 1996, **16**(5): 662~665
- 2 Tan Weiguo, Liu Dahe, Huang wanyun. The bandwidth and the diffraction efficiency considering the absorption of recording medium in the reflective holographic filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, **8**(2):152~156 (in Chinese)  
唐伟国,刘大禾,黄婉云. 反射式全息滤光片的带宽和考虑记录介质吸收后的衍射效率[J]. 光学学报, 1988, **8**(2): 152~156
- 3 Li Tingfen. Reflection hologram[J]. *J. Chongqing Teachers College* (Natural Science Edition), 1997, **14**(2): 84~86 (in Chinese)  
李廷芬. 反射全息图[J]. 重庆师范学院学报(自然科学版), 1997, **14**(2): 84~86
- 4 Wan Hua, Chen Xinrong, Wu Jianhong. Study on the characteristics of multilayer dielectric grating profile by the rigorous coupled-wave method [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1275~1278 (in Chinese)  
万 华,陈新荣,吴建宏. 利用严格耦合波方法研究多层介质膜光栅掩膜特性[J]. 中国激光, 2005, **32**(9): 1275~1278
- 5 Wang Bo, Tao Shiquan, Chen Jiabi. Re-investigation on the solution to two-dimensional coupled wave equations for volume holographic gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(1): 21~25 (in Chinese)  
王 博,陶世荃,陈家璧. 体光栅二维耦合波方程解析解的再探讨[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 21~25 (in Chinese)
- 6 Wang Xin, Yan Aimin, Liu De'an *et al.*. Formation and diffraction characteristics of local volume photorefractive holographic gratings in two doped  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  crystals[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(3): 362~363 (in Chinese)  
王 欣,闫爱民,刘德安 等. 双掺杂  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  晶体局域光折变体全息光栅形成及衍射特性[J]. 中国激光, 2006, **33**(3): 362~363
- 7 Yan Aimin, Liu Liren, Liu De'an *et al.*. Diffraction characteristics of local volume holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1203~1208 (in Chinese)  
闫爱民,刘立人,刘德安 等. 局域体全息光栅的衍射特性[J]. 光学学报, 2004, **24**(9): 1203~1208
- 8 You Shanhong, Li Xinwan, Wu Jianhong *et al.*. Tunability of nonuniform reflection holographic filter[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(9): 895~896 (in Chinese)  
游善红,李新碗,吴建宏 等. 反射全息滤光片调谐性能的研究[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(9): 895~896
- 9 Fan Chen, Jiang Chaochuan, Guo Luerong. Analyses of rainbow holography with the line-element hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(9): 845~850 (in Chinese)  
范 诚,江朝川,郭履容. 从线全息图分析彩虹全息[J]. 光学学报, 1990, **10**(9): 845~850
- 10 Yu Meiwen. *Optical Holography and Its Applications* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 96~98, 178~179 (in Chinese)  
于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996. 96~98, 178~179
- 11 Wang Yang, Wang Zhaoqi, Guo Huanqing *et al.*. Impact of higher-order wavefront aberrations of human eyes on vision performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1520~1524 (in Chinese)  
王 杨,王肇圻,郭欢庆 等. 人眼的高级像差对视功能的影响[J]. 光学学报, 2005, **25**(11): 1520~1524
- 12 Wang Ce, Pu Donglin, Zhu Tianchu *et al.*. Fabrication of panchromatic ultra-fine-grain silver halide emulsions and properties in reflection holography [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(12):1349~1351(in Chinese)  
王 策,蒲东林,朱天淳 等. 自制超细颗粒卤化银乳胶及其衍射特性[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(12): 1349~1351