

广角大场景全息图光栅结构最高空频表式的理论分析

印建平

(苏州大学)

陆俊发

(华东地质学院)

提要: 根据三维干涉条纹峰值强度面方程, 导出了广角大场景平面全息图光栅结构的最高空间频率的一般表达式; 并就广角大场景全息照相实验中记录参数(α_R^* , β)的合理选取等问题进行了分析讨论, 给出了相应的实验结果。

Theoretical analysis of highest space-frequency formula on holographic grating structure with wide angle and great scene

Yin Jianping

(Suzhou University, Suzhou)

Lu Junfa

(East China Geology Institute, Nanjing)

Abstract: According to the equation on peak intensity plane of 3-D interference fringe, a general formula on the highest space-frequency of holographic grating structure with wide angle and great scene is derived, analyses on reasonable choice of recording parameter (α_R^* , β) in the holographic experiment of wide angle and great scene is discussed, and the corresponding experimental results are given.

一、引言

大场景或大景深全息照相已见报道^[1, 2]。目前场景面积已达数个平方米, 景深达数米, 但视场角一般小于 90° 。

众所周知, 平面全息图光栅结构的最高空间频率与被摄场景的大小、全息图的类型以及记录光路的几何结构有关。就离轴全息照相而言, 记录介质有限的分辨率, 不仅影响再现像的分辨率, 而且直接限制了被摄场景的视场角。然而在大场景全息照相中, 由于全息台几何尺寸有限, 为了获得场景面积尽可能大的全息图, 往往会遇到大视场角的全息记录问题。理论分析及实验表明, 改变传

统记录光路的几何结构, 采用参、物光束异面入射记录光路, 并合理选取记录参数(α_R^* , β), 即可克服因记录介质分辨率有限而导致场景视场角受限的困难, 实现广角大场景全息照相。本文从干涉条纹峰值强度面方程出发, 导出了广角大场景平面全息图光栅结构的最高空间频率表式, 并初步获得了场景面积为 $100 \times 230 \text{ cm}^2$, 景深为 230 cm 和视场角达 120° 的广角大场景全息图。

二、推 导

2.1 参、物光束异面入射情形

收稿日期: 1986年10月22日; 收到修改稿日期: 1987年1月19日。

设全息图光栅结构的空周期矢量为 \mathbf{A} , 参、物光波的波矢分别为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{K}_R &= \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \alpha_R \mathbf{e}_x + \cos \beta_R \mathbf{e}_y + \cos \gamma_R \mathbf{e}_z) \\ \mathbf{K}_0 &= \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \alpha_0 \mathbf{e}_x + \cos \beta_0 \mathbf{e}_y + \cos \gamma_0 \mathbf{e}_z) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

则由三维干涉条纹峰值强度面方程

$$(\mathbf{K}_R - \mathbf{K}_0) \cdot \mathbf{A} = 2\pi \quad (2)$$

得到

$$(\cos \alpha_R - \cos \alpha_0) \Delta_x + (\cos \beta_R - \cos \beta_0) \Delta_y + (\cos \gamma_R - \cos \gamma_0) \Delta_z = \lambda \quad (3)$$

式中 Δ_x 、 Δ_y 与 Δ_z 分别为矢量 \mathbf{A} 的三个分量。由于通常物光波的波矢 \mathbf{K}_0 在 xOy 平面 (即全息台平面) 内, 而全息干版在 xOz 平面 (即垂直于全息台面的平面) 内, 如图 1 所示,

故有 $\gamma_0 = \frac{\pi}{2}$, $\Delta_y = \infty$, 代入 (3) 式得到

$$(\cos \alpha_R - \cos \alpha_0) \Delta_x + \cos \gamma_R \Delta_z = \lambda \quad (4)$$

如果分别令 $\Delta_x = 0$, $\Delta_z = 0$, 则由 (4) 式得干涉条纹面在 x 、 z 方向上的空间周期为,

$$\left. \begin{aligned} \Delta_x &= \frac{\lambda}{\cos \alpha_R - \cos \alpha_0} \\ \Delta_z &= \frac{\lambda}{\cos \gamma_R} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

相应的空间频率分量为

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{1}{\lambda} (\cos \alpha_R - \cos \alpha_0) \\ f_z &= \frac{1}{\lambda} \cos \gamma_R \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据空间频率矢量

$$\mathbf{f} = f_x \mathbf{e}_x + f_z \mathbf{e}_z \quad (7)$$

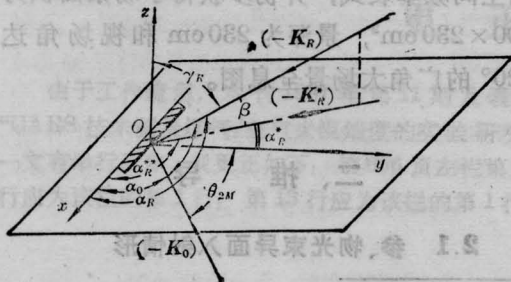


图 1

得平面全息图光栅结构沿全息图平面 (即 xOy 平面) 的空间频率

$$f = \frac{1}{\lambda} [(\cos \alpha_R - \cos \alpha_0)^2 + \cos^2 \gamma_R]^{1/2} \quad (8)$$

设 β 为参考光波矢 \mathbf{K}_R 与全息台平面的夹角, 则有 $\beta = \frac{\pi}{2} - \gamma_R$, 再令物光波矢 \mathbf{K}_0 与 y 轴的最大夹角为 θ_{2M} , 参考光波矢 \mathbf{K}_R 在全息台平面的分量 \mathbf{K}_R^* 与 x 轴、 y 轴的夹角分别为 α_R^* 与 α_R^* , 则有

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_R &= \cos \alpha_R^* \cos \beta \\ \cos \gamma_R &= \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

及

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{\pi}{2} - \theta_{2M} \\ \alpha_R^* &= \frac{\pi}{2} + \alpha_R^* \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

得到广角大场景平面全息图光栅结构的最高空间频率的一般表达式

$$f_{\max} = \frac{1}{\lambda} [(\sin \alpha_R^* \cos \beta + \sin \theta_{2M})^2 + \sin^2 \beta]^{1/2} \quad (11)$$

相应的被摄场景视场角为 $\theta_M \leq 2(\theta_{2M} + \alpha_R^*)$ (当 $\alpha_R^* \leq 35^\circ$ 时)。

当 $\alpha_R^* = 0$ 时, 由 (11) 式得参考光束异面正入射情形下广角大场景全息图光栅结构的空频表式

$$f_{\max}^{(1)} = \frac{1}{\lambda} [\sin^2 \theta_{2M} + \sin^2 \beta]^{1/2} \quad (12)$$

相应的场景视场角为 $\theta_M \leq 2\theta_{2M}$ 。

2.2 参、物光束共面入射情形 (作为特例)

2.2.1 参、物光束共面非对称入射情形
设 $\beta = 0$, $\alpha_R^* \neq \theta_{2M}$, 则由 (11) 式得到

$$f_{\max}^{(2)} = \frac{1}{\lambda} (\sin \alpha_R^* + \sin \theta_{2M}) \quad (13)$$

相应的被摄场景视场角为 $\theta_M \leq \theta_{2M} + \alpha_R^*$ 。此外, 如果令全息图法线 (即 y 轴) 与干涉条纹面的夹角为 δ , 则有

$$\left. \begin{aligned} \alpha_R^* &= \frac{\theta_M}{2} + \delta \\ \theta_{2M} &= \frac{\theta_M}{2} - \delta \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

代入(13)式得到另一表式

$$f_{\max}^{(2)} = \left(\frac{2}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{\theta_M}{2}\right) \cos \delta \quad (15)$$

2.2.2 参考光束正入射情形

设 $\beta=0$, $\alpha_R^*=0$, 则由(11)式得

$$f_{\max}^{(3)} = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \sin \theta_{2M} \quad (16)$$

相应的被摄场景视场角为 $\theta_M \leq \theta_{2M}$ 。

2.2.3 参、物光束共面对称入射情形

设 $\beta=0$, $\alpha_R^* = \theta_{2M} = \theta_M/2$ (相当于 $\delta=0$), 则由(11)式或(15)式得到

$$f_{\max}^{(4)} = \left(\frac{2}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{\theta_M}{2}\right) \quad (17)$$

相应的场景视场角为 $\theta_M = \theta_{2M} + \alpha_R^* = 2\theta_{2M}$ 。

由此可见, 上述(13)、(15)、(16)与(17)式分别与文献结果一致。

三、分 析

设 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $\alpha_R^* = \beta = 20^\circ$, 则由(11)、(12)、(13)、(16)及(17)式计算得广角大场景全息图, 一般平面全息图光栅结构最高空间频率与场景视场角 θ_M 的关系曲线, 如图2所示。我国天津I型全息干版的极限分辨率 $f_0 \geq 3000 \text{ cy/mm}$, 如果允许全息图光栅结构的最高空间频率 $f_{\max} = \frac{f_0}{2} = 1500 \text{ cy/mm}$, 则由图2知, 传统的参、物光束共面记录光路所能获得的被摄场景视场角 $\theta_M \leq 71.5^\circ$; 而采用参、物光束异面入射记录光路所能获得的场景视场角 θ_M 达 110° , 甚至大于 130° (当 $\alpha_R^*=0$, $\beta \leq 20^\circ$ 时)。因此, 为实现 $\theta_M \geq 110^\circ$ 的广角大场景全息照相, 必须采用图1所示的改进型记录光路。

当 $\alpha_R^*=0$, 而 $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时, 由(12)式计算得参考光束异面正入射情形下, 广角大场景全息图光栅结构的最高空间频率曲

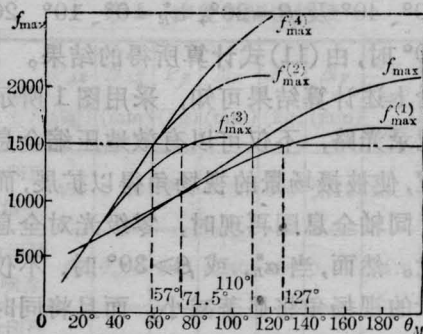


图 2

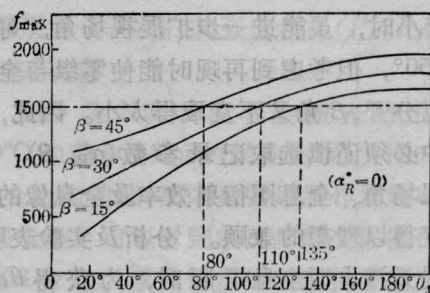
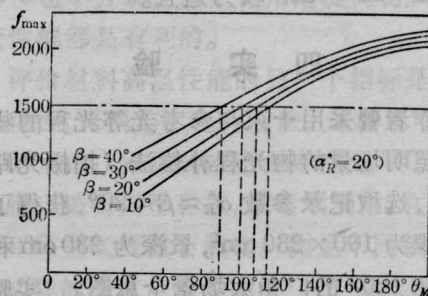
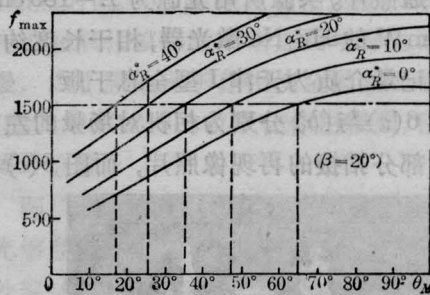


图 3



(a)



(b)

图 4

线, 如图3所示。

图4(a)与(b)分别为 $\alpha_R^*=20^\circ$, $\beta=10^\circ$ 、

20°、30°、40° 及 $\beta=20^\circ$, $\alpha_r^*=0^\circ$ 、10°、20°、30°、40° 时, 由(11)式计算所得的结果。

由上述计算结果可知, 采用图 1 所示的全息记录光路, 不仅可以有效地压缩全息图的带宽, 使被摄场景的视场角得以扩展, 而且克服了同轴全息图再现时, 零级光对全息像的干扰。然而, 当 α_r^* , 或 $\beta > 30^\circ$ 时, 不仅被摄场景的视场角将显著减小, 而且将同时导致全息图干涉条纹对比度的严重下降, 从而影响全息图的衍射效率与信噪比。此外, 当 β 角较小时, 虽能进一步扩展视场角, 可望 $\theta_M \geq 150^\circ$, 但考虑到再现时能使零级与全息像足以分开, β 角又不宜取得太小。因此, 在实验中必须谨慎选取记录参数 (α_r^* , β), 使场景视场角、全息图衍射效率及全息像的方便观察得以理想的兼顾。分析及实验表明, 当采用天津 I 型全息干版时, 为获得 $\theta_M \geq 110^\circ$ 的广角大场景全息图, 选取 $\alpha_r^*=0^\circ \sim 30^\circ$, $\beta=15^\circ \sim 30^\circ$ 较为适宜。

四、实 验

作者曾采用十束与参考光等光程的物光分区照明场景的物光程补偿法 (拍摄光路图从略), 选取记录参数 $\alpha_r^* \approx \beta \approx 20^\circ$, 获得了场景面积为 $100 \times 230 \text{ cm}^2$, 景深为 230 cm 和视场角达 120° 的广角大场景全息图。实验结果如图 6 所示, 图 5 为照相机直接对场景拍摄的普通照片。实验所用光源为 $L=150 \text{ cm}$, $P=60 \text{ mW}$ 的 He-Ne 激光器, 相干长度约为 20 cm, 记录介质为天津 I 型全息干版。

图 6(a) 与 (b) 分别为相机对场景的左前与右前部分拍摄的再现像照片, 而图 6(c) 与

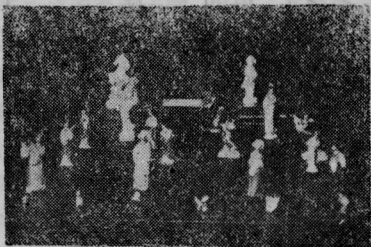


图 5



(a)



(b)



(c)



(d)

图 6

(d) 分别为相机对场景的后部及右中部拍摄的再现像照片。

作者感谢幸良梁、夏建刚和胡祖元同志的帮助。

参 考 文 献

- 1 Gates J W. *J. Scient. Instrum.*, 1968; 1 (10): 989
- 2 Bjelkhagen H I. *Proc. SPIE*, 1977; 120: 122
- 3 于美文 *et al.* 光学全息及信息处理, 国防工业出版社, 1984: 6