

全息透镜成象质量的评价

徐昆贤

(上海市激光技术研究所)

提要: 本文应用经典的光学传递函数 (OTF) 来评价有象差的全息透镜的象质, 得出了考虑三级单色象差的全息透镜 OTF 的计算结果。分析了 OTF 在全息透镜象质评价中的作用。

Evaluation of imaging quality of holographic lenses

Xu Kunxian

(Shanghai Institute of Laser Technology)

Abstract: The classical optical transfer function is used to evaluate the imaging quality of holographic lenses with aberrations. The calculation results of OTF of holographic lenses having the third order monochromatic aberrations have been obtained. The function of OTF of holographic lenses in evaluating the imaging quality is analyzed.

运用衍射原理的薄膜型全息光学元件, 特别是全息透镜, 由于它制造方便、重量轻、成本低、性能可靠和多功能特性, 使得全息透镜在经常使用傅里叶变换透镜、分束器和光谱滤波器等元件的光学信息处理系统中日益得到广泛的应用^[1,2]。使用全息透镜中遇到的主要问题是如何保证它在有效的视场范围内, 满足一定分辨率的要求。因此希望在记录阶段就能对全息透镜的象质进行预先估计, 以便合理地选择全息图系统参数, 或作出对全息透镜系统象差校正的建议。

对光学系统的象质评价已有若干计算标准^[3~5], 其中经典光学传递函数 (OTF) 能给出透镜有效象场内的象质分布或分辨率与有效象场之间的关系。因此用 OTF 来评价全息透镜的象质应是合适的。

为了研究全息透镜三级象差(主要为彗差和象散)各自对象质的影响, 最好能形成具有单一象差的全息图系统。由于全息图的象差与全息图的记录和再现几何学(图1), 即物点源 O 、参考点源 R 、再现点源 C 到全息图的距离 R_0 、 R_R 、 R_C 和它们与全息图法线的夹角 α_0 、 α_R 、 α_C 等有关。因此, 只要选择合适的光束参数 R_i 和方向 α_i , 就能对再现波前给出单一象差^[6]。

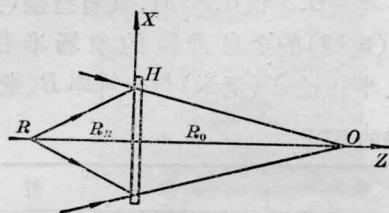
图1表示会聚光束轴上全息透镜的记录和再现的几何学。全息透镜的记录和再现的参数为: 全息透镜方形孔径 $2X=20$ 毫米, 焦距 $f_H=66.67$ 毫米, 记录和再现的波长 $\lambda=\lambda_0=\lambda_C=0.6328$ 微米。

$$R_R=100 \text{ 毫米}, \quad \alpha_R=0^\circ,$$

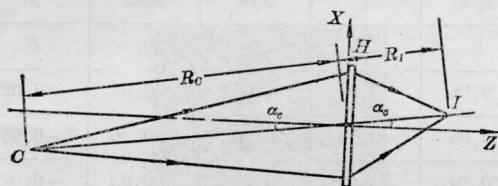
收稿日期: 1983年3月1日。

$$\begin{aligned}
 R_C &= 300 \text{ 毫米}, & \alpha_C &= 5^\circ, \\
 R_0 &= -200 \text{ 毫米}, & \alpha_0 &= 0^\circ; \\
 R_I &= -85.71 \text{ 毫米}, & \alpha_I &= 5^\circ,
 \end{aligned}$$

由图 1 可知: 再现光束 O 与记录时的参考光束 R 在距离和方向上均有变化, 即 $R_O \neq R_R$, $\alpha_O \neq \alpha_R$ 。所以该全息图的象差是以存在斜光束象差为特征的, 其中彗差和象散是影响全息透镜象质的主要象差。球差较小, 场曲和畸变不影响象的锐度, 只影响象的位置。



(a)



(b)

图 1 全息透镜的记录和再现几何学

设在全息图平面有一具有波象差为 $W(x, y)$ 的光瞳函数 $P(x, y)$:

$$P(x, y) = p(x, y) \exp[jkW(x, y)], \quad (1)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$

$$p(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{l}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{l}\right), \quad (2)$$

$p(x, y)$ 为衍射受限全息透镜的孔径函数。 l 为方形出射光瞳的边长。

$$\begin{aligned}
 W(x, y) &= -\frac{1}{8} \{(x^2 + y^2)^2 S \\
 &\quad - 4x(x^2 + y^2)C + 4x^2 A\} \\
 &= \Delta S(x, y) + \Delta C(x, y) + \Delta A(x, y) \quad (3)
 \end{aligned}$$

根据文献[7], 上述全息透镜的三级象差可表示为:

球差

$$\Delta S = \frac{1}{8} x^4 \left(\frac{1}{R_0^3} + \frac{1}{R_I^3} \right), \quad (4)$$

彗差

$$\Delta C = \frac{x^3 \cos^2 \alpha_C \sin \alpha_C}{2} \left(\frac{1}{R_I^2} - \frac{1}{R_0^2} \right). \quad (5)$$

象散

$$\Delta A = -\frac{x^2 \sin^2 \alpha_C}{2f_H}. \quad (6)$$

$$\frac{1}{f_H} = \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R_0}. \quad (7)$$

OTF 可以用规化了的光瞳函数的自相关函数^[8]表示, 我们采用如下的函数形式:

$$\mathcal{H}(r, s) = \frac{\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P\left(x - \frac{\lambda f_H r}{2}, y - \frac{\lambda f_H s}{2}\right) \times P\left(x + \frac{\lambda f_H r}{2}, y + \frac{\lambda f_H s}{2}\right) dx dy \right\}}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy} \quad (8)$$

式中 $r = \frac{x}{\lambda f_H}$, $S = \frac{y}{\lambda f_H}$ 为空间频率。

我们计算了方形光瞳 $l = l_x = l_y = 20$ 毫米, $f_H = 66.67$ 毫米, $\lambda = \lambda_0 = \lambda_C = 0.6328$ 微米的轴上全息透镜的 OTF。用于计算 OTF 的在瞳孔边缘处的球差、彗差和象散的最大波象差值用 W_{\max} 表示。计算结果见表 1, 象差曲线见图 2, 由表 1 可知 W_{\max} 的变化范

表 1 全息透镜孔径与其波象差 $W(\lambda)$ 的关系(单位: 微米)

	全息透镜半孔径(毫米)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔS	0.0003	0.005	0.02	0.07	0.2	0.4	0.7	1.2	1.9	2.9
ΔC	0.009	0.01	0.2	0.5	1.1	1.8	2.9	4.4	6.2	8.5
ΔA	0.09	0.4	0.8	1.4	2.3	3.2	4.4	5.8	7.3	9.0

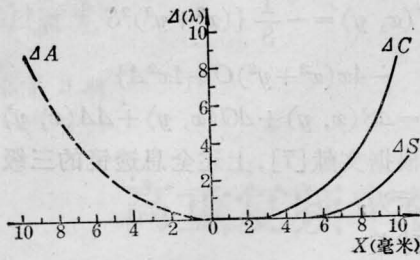


图2 全息透镜的象差曲线

围为 $\frac{1}{10} \lambda - 9\lambda$ 。

按(8)式分别计算了与全息透镜的球差、彗差和象散的最大波象差为 $W_{\max} = \lambda, \frac{\lambda}{2}$,

$\frac{\lambda}{4}$ 时对应的一维(x方向)OTF值(表3),图3示出球差(实线)、彗差(虚线)和象散(点划线)的OTF曲线族。图中 $r_0 = l/2\lambda f_H$ 为相干照明下成象系统截止频率。

所获得的全息透镜的OTF,对全息透镜的象质评价有着重要意义。基于对全息透镜OTF的分析,我们可求出存在象差的全息透镜在有不同的 \mathcal{H} 值时,全息透镜的有效象场半径 Δx 与分辨率 R 的关系。表3和图4、5表示当 $\mathcal{H} = 0.5$ 和 0.25 时,具有彗差(实线)和象散(虚线)的全息透镜的象场半径 ΔX (毫米)、半孔径 X (毫米)与分辨率 R (毫米 $^{-1}$)

表2 全息透镜的三级单色象差的OTF

$\frac{r}{2r_0}$	球 差			彗 差			象 散		
	$W(\Delta S)$			$W(\Delta C)$			$W(\Delta A)$		
	$\lambda/4$	$\lambda/2$	λ	$\lambda/4$	$\lambda/2$	λ	$\lambda/4$	$\lambda/2$	λ
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9	0.099	0.09	0.08	0.09	0.08	0.03	0.09	0.07	0.02
0.8	0.19	0.18	0.14	0.16	0.08	-0.04	0.16	0.06	-0.04
0.7	0.29	0.26	0.145	0.21	0.04	-0.03	0.20	0.02	-0.02
0.6	0.38	0.33	0.15	0.25	-0.003	0.008	0.23	-0.03	0.03
0.5	0.47	0.40	0.17	0.30	0.02	0.03	0.28	-0.05	0.05
0.4	0.57	0.49	0.23	0.38	-0.005	0.01	0.35	-0.04	0.04
0.3	0.67	0.60	0.35	0.49	0.09	-0.08	0.47	0.04	-0.04
0.2	0.78	0.73	0.55	0.66	0.32	0.17	0.64	0.27	-0.17
0.1	0.89	0.87	0.80	0.85	0.70	0.25	0.84	0.68	0.20
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表3 $\mathcal{H} = 0.25$ 和 0.5 时全息透镜 ΔX 、 X 与 R 的关系

W (λ)	R (毫米 $^{-1}$)							
	彗 差				象 散			
	ΔX (毫米)	X (毫米)	\mathcal{H}		\mathcal{H}		ΔX (毫米)	X (毫米)
			0.5	0.25	0.5	0.25		
0	0	0	118	178	118	178	0	0
$\lambda/4$	0.76	3.1	71	142	73	130	4.45	1.6
$\lambda/2$	1.57	3.9	36	53	33	50	6.28	2.4
λ	3.14	5.0	17	24	16	22	8.90	3.3

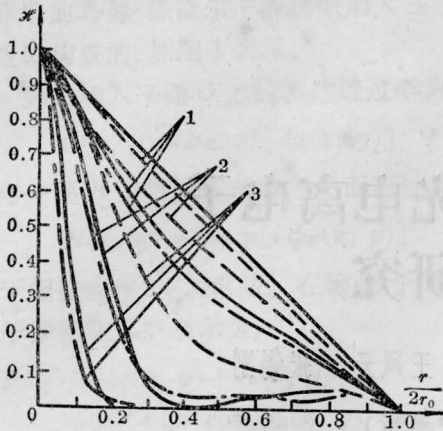


图3 方形瞳孔的全息透镜 OTF 截面

1— $W_{\max} = \frac{\lambda}{4}$, 2— $W_{\max} = \frac{\lambda}{2}$, 3— $W_{\max} = \lambda$,

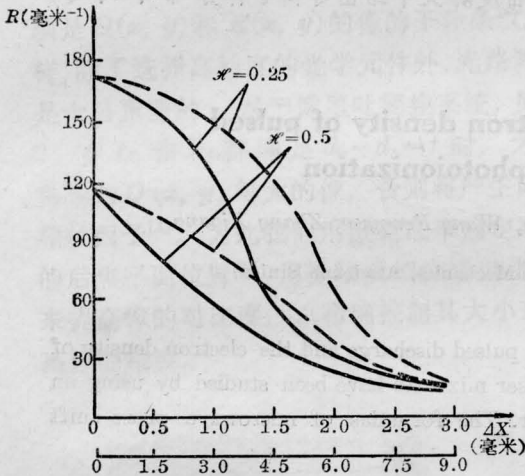


图4 全息透镜的象场半径与分辨率的关系

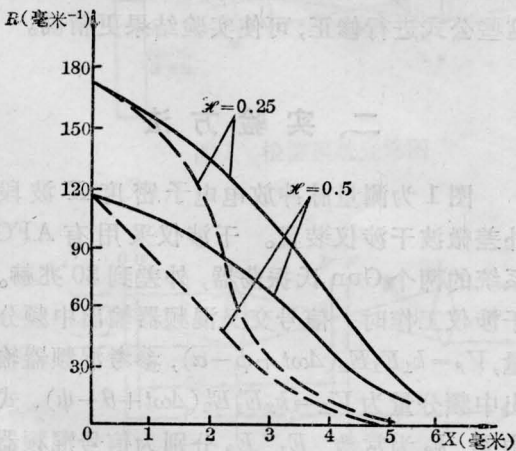


图5 全息透镜的孔径与分辨率的关系

之间的关系。

因此,根据全息透镜 OTF 分析,我们就能从所要求获得的全息透镜象质的观点来评价全息透镜的性能和选择全息透镜的最佳记录参数。例如对上述全息透镜来说,如果考虑彗差的影响,当 $\mathcal{H}=0.5$ 以及目标的线视场尺寸为 $0.76 \times 2 = 1.52$ 毫米时,全息透镜有 $\frac{\lambda}{4}$ 的波象差和有 71 线/毫米分辨率。如考虑象散的影响,在 $\mathcal{H}=5.0$ 以及同样达到 $\lambda/4$ 波象差和 71 线/毫米的分辨率,全息透镜的线视场尺寸可达 $4.45 \times 2 \approx 9$ 毫米。由此可知:彗差比象散更加严重地影响着全息透镜有效象场半径。同样,由图 5 或表 3 可知:在达到上述相同的波象差($\frac{\lambda}{4}$)和分辨率(71 线/毫米)时,彗差允许其孔径尺寸为 $3.1 \times 2 = 6.2$ 毫米,而象散则为 $1.6 \times 2 = 3.2$ 毫米。因此,象散则比彗差更加严重地限制着全息透镜孔径的尺寸。

基于对全息透镜的 OTF 分析,不仅在全息透镜记录阶段,就能预先从获得一定象质的要求上来选择全息透镜的最佳记录参数,而且在全息透镜记录好之后,或者全息透镜与常规光学系统组合应用时,能根据全息透镜的 OTF 得出的结果,用减小象场尺寸和限制视场分辨率的办法来校正系统象差。

参 考 文 献

- [1] J. R. Fienup, C. D. Lenard; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 5, 631.
- [2] B. J. Chang; *Opt. Eng.*, 1980, **19**, 642.
- [3] Lord Ragleigh; *Phil. Mag.*, 1879, **5**, 403.
- [4] M. Born, E. Wolf; *Principle of Optics*, Pergamon, New York, 1959.
- [5] O' Neill; *Introduction to Statistical Optics*, Addison Wesleg, Reading Mass.
- [6] Yukihiro Ishii *et al.*; *Optica Acta*, 1979, **26**, No. 8, 969.
- [7] D. H. Close; *Opt. Eng.*, 1975, **14**, No. 5, 408.
- [8] J. W. Goodman; *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, 1963.