

用数字滤波消除散斑条纹图噪声

胡 逸 群

(长沙铁道学院科研所)

提 要

本文讨论了散斑摄影条纹图的噪声来源及模型,设计合适的数字滤波器。采取正交实验手段,全面分析了噪声、条纹对比度和密度对条纹方向及间距测量精度的影响。

关键词: 散斑摄影条纹图, 数字滤波, 衍射晕。

一、引 言

文献[1]讨论了由于非均匀背景-衍射晕的存在,无噪声散斑摄影条纹图条纹方向、间距的计算机测量精度与对比度、条纹密度的关系,展示了消除衍射晕影响后的结果。但晕本身充满噪声,文献[1]未涉及此问题。文献[2]采用非相干光照明散斑图的光学处理,降低了条纹图的散斑噪声,该方法的缺点是光能损失大,不能消除衍射晕变化照度的影响。本文讨论噪声模型,设计合适的数字滤波器,编制既消除噪声、又克服变化照度影响的程序,进行模拟计算,并利用正交实验手段,全面分析所得结果。

二、噪 声 模 型

物体产生面内位移时,散斑摄影条纹图的照度公式为

$$\hat{i}(x, y) = \left[\frac{1-\nu}{1+\nu} + \frac{2\nu}{1+\nu} \cos^2 \frac{\pi}{g} \mathbf{r} \cdot \mathbf{s} \right] \hat{i}_h(x, y) \quad (1)$$

$\mathbf{r} = (x, y)$ 是观察平面位置矢量, ν 是对比度, \mathbf{s} 为垂直于杨氏条纹方向的单位矢量, g 为条纹间距, \hat{i}_h 是晕函数。根据文献[3],单次曝光散斑图的复透过率为

$$t(x_1, y_1) = \phi(x_1, y_1) \sum_k a(b_k, c_k) \exp[j2\pi(b_k x_1 + c_k y_1)] \quad (2)$$

(x_1, y_1) 是散斑图平面坐标, b_k, c_k 是具有一定统计规律的随机变量, ϕ 是散斑图轮廓的孔函数。用逐点法分析散斑图,略去常数因子,在观察平面上得到 $t(x_1, y_1)$ 的傅氏变换即衍射晕,其复振幅为

$$\mathcal{F}\{t(x_1, y_1)\} = \Phi\left(\frac{x}{\lambda z}, \frac{y}{\lambda z}\right) * \sum_k a(b_k, c_k) \delta\left(\frac{x}{\lambda z} - b_k, \frac{y}{\lambda z} - c_k\right) \quad (3)$$

Φ 是读出光束截面函数的富氏变换, z 是观察平面与散斑图之间的距离, λ 为光波波长。因为 Φ 是 δ 函数的粗略近似,交叉项可忽略,得衍射晕公式

收稿日期: 1988年1月12日; 收到修改稿日期: 1988年3月21日

$$\hat{i}_n(x, y) = \sum_k |a(b_k, c_k)|^2 \cdot \left| \Phi \left(\frac{x}{\lambda z} - b_k, \frac{y}{\lambda z} - c_k \right) \right|^2. \quad (4)$$

(4)式表明,衍射晕由一系列谱点组成,谱点的大小与读出光束直径成反比,谱点也是随机分布的。为了计算上的方便,将上式写为

$$\hat{i}_n(x, y) = \hat{i}_{n0}(x, y) [1 + kn_1(x, y)], \quad (5)$$

式中 $\hat{i}_{n0}(x, y)$ 是仅由记录系统孔径决定的无噪声衍射晕。当记录系统具有圆形孔径时,晕函数 \hat{i}_{n0} 可表为 $\hat{i}_{n0}(\rho)$, $0 \leq \rho \leq 1$ 是归一化径向位置。 k 是常数, $n_1(x, y)$ 是与信号无关的噪声因子。由于散斑图记录介质内部的颗粒散射以及实验现场的各种背景衍射散射、电视摄像机内部探测器阵列和图像处理系统电路的固有噪声,均有可能给图像附加一个噪声分量 $n_2(x, y)$ 。因此有噪声散斑摄影条纹图的照度公式为

$$\hat{i}(x, y) = \hat{i}_0(x, y) [1 + kn_1(x, y)] + n_2(x, y), \quad (6)$$

$$\hat{i}_0(x, y) = \left[\frac{1-\nu}{1+\nu} + \frac{2\nu}{1+\nu} \cos^2 \frac{\pi}{g} \mathbf{r} \cdot \mathbf{s} \right] \hat{i}_{n0}(x, y). \quad (7)$$

假定 n_1 是具有零平均、标准差为 σ 的高斯分布随机变量; n_2 是灰度在 $0 \sim \tau$ 之间均匀分布的随机变量。 \hat{i}_0 是无噪声散斑摄影条纹图。 $\hat{i}_0 kn_1$ 是与信号有关的灰度噪声, n_2 是与信号无关的灰度噪声。

三、滤波器设计

散斑摄影条纹图既有相乘性噪声 $\hat{i}_0 kn_1$, 又有相加性噪声 n_2 。为此, 首先将方程(6)改写为:

$$\hat{i}(x, y) = s(x, y) + n_2(x, y). \quad (8)$$

把 s 视为“信号”, 构成只有相加性噪声的形式。那么就可利用 Wiener-Hopf 滤波器来得到与 s 均方误差 ε 最小的输出图像^[4]

$$s = \lim_{\substack{x_0 \rightarrow \infty \\ y_0 \rightarrow \infty}} \int_{-x_0/2}^{x_0/2} \int_{-y_0/2}^{y_0/2} [\hat{i}(x, y) * \hat{t}(x, y) - s(x, y)] dx dy. \quad (9)$$

$\hat{t}(x, y)$ 是 Wiener-Hopf 滤波器振幅透过率 $T_A(u, v)$ 的逆傅氏变换。

$$T_A(u, v) = \Phi_{is} / \Phi_{ii} = (\Phi_{ss} + \Phi_{sni}) / (\Phi_{ss} + \Phi_{sni} + \Phi_{n2ni}). \quad (10)$$

Φ_{is} 、 Φ_{sni} 分别是 i 与 s 、 s 与 n_2 的互相关的傅里叶谱, Φ_{ss} 、 Φ_{ii} 、 Φ_{n2ni} 分别是 s 、 i 、 n_2 的自相关的傅里叶谱。由于 n_2 是实函数, 且与 s 不相关, 因此 s 与 n_2 的互相关 R_{sni} 可近似为常数 c_1 , 显然

$$\Phi_{sni} = c_1 \delta(u, v). \quad (11)$$

一般情况下, n_2 是白噪声, 即它的谱几乎是常量 Φ_{n2ni} 可用常数 c_2 近似。设 $S(u, v)$ 是 $s(x, y)$ 的富氏变换, 则

$$\Phi_{ss} = |S(u, v)|^2. \quad (12)$$

根据以上讨论, 方程(10)可改写为

$$T_A(u, v) = [|S(u, v)|^2 + c_1 \delta(u, v)] / [|S(u, v)|^2 + c_1 \delta(u, v) + c_2]. \quad (13)$$

使用这一形式的滤波器, 能得到消除了相加噪声 n_2 、但仍保留相乘噪声 $\hat{i}_0 kn_1$ 的图像。根据方程(8)及方程(6)

$$S(u, v) = \mathcal{F}\{\hat{i}_0(x, y) + \hat{i}_0(x, y)n_1(x, y)k\} = I_0(u, v) + I_0(u, v)*N_1(u, v) \cdot k. \quad (14)$$

I_0 、 N_1 分别是 \hat{i}_0 、 n_1 的富氏变换。 I_0 是低频分量, 消除晕的变化照度后主要是杨氏条纹的谱(两个对称分布的 δ 函数), n_1 是高频丰富的随机变量, $N_1(u, v)$ 可用随机分布的 δ 函数近似, 因此, 忽略其交叉项

$$|S(u, v)|^2 = |I_0(u, v)|^2 + k^2 |I_0(u, v)*N_1(u, v)|^2. \quad (15)$$

我们设计一个低通滤波器, 只让 I_0 通过, 而将 I_0*N_1 的高频部分挡掉。滤波器的最终形式为

$$T_A(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{对于 } 0 \leq |\omega| < \omega_c, \\ 0 & \text{其他。} \end{cases} \quad (16)$$

$\omega = \pm(u^2 + v^2)^{1/2}$, ω_c 为截止频率。将这一滤波器与 $I(u, v)$ 相乘, 再做乘积的逆傅氏变换, 得到基本消除了各项噪声的条纹图。尔后可方便地测量间距。

四、计算方法及过程

1. 有噪声散斑摄影条纹图的计算机模拟

有噪声散斑摄影条纹图的照度矩阵为

$$\hat{i}(m, n) = \hat{i}_0(m, n)[1 + kn_1(m, n)](127 - \tau)/q + n_2(m, n), \quad (17)$$

m, n 表示像素的行、列序号, 随机噪声 n_1, n_2 由标准计算程序产生, 图像尺寸为 256×256 , $q = MA \times [\hat{i}_0(1 + kn_1)]$, 当 $(1 + kn_1) < 0$ 时令其为 0。方程(17)既保证了图像灰度在 $0 \sim 127$ 之间, 又确使 n_2 与信号无关。图 1 是计算机模拟的白光散斑摄影条纹图照片。随着 τ 的增加, 实际的条纹对比度下降。

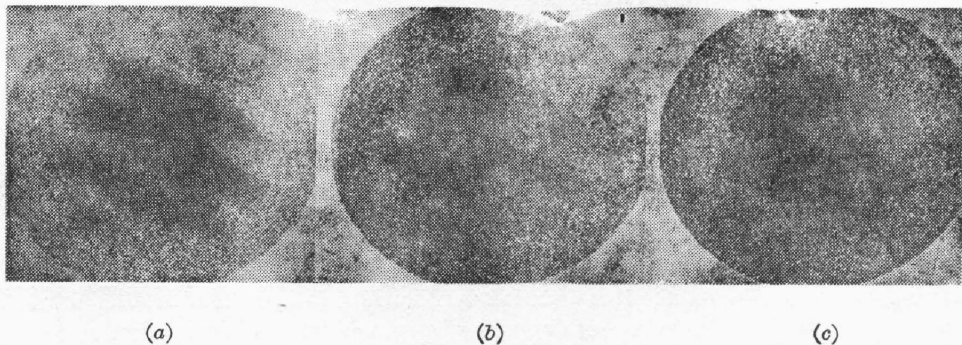


Fig. 1 Analogous noisy white light speckle photography fringe patterns, halo's diameters are 240 pixel, $g=40$ pixel, $\nu=0.55$, $k\sigma=0.1$ and (a) $\tau=12$ (b) $\tau=25$ (c) $\tau=38$

2. 条纹方向的确定

以衍射晕中心为圆心, 选取适当长度和角间距, 做一系列径向矢量。沿着这些矢量进行灰度积分, 积分值最大的角位置即为条纹方向。

3. 消除衍射晕的影响

过晕中心且平行于条纹方向的直线(即中央亮纹中心线)上的灰度分布用 $\hat{i}_h(\rho)$ 表示, 由于噪声存在, 用它进行图像的灰度变换是不行的。为此, 取该直线上各点 (l_1, l_2) 邻域的灰度平均, 得到 $\hat{i}_{h0}(\rho)$ 的近似

$$i_{ho}(\rho) \approx \frac{1}{9} [i(l_1-1, l_2-1) + i(l_1-1, l_2) + \dots + i(l_1+1, l_2+1)]. \quad (18)$$

$i_h(\rho)$ 与 $i_{ho}(\rho)$ 见图 2, 它们取自图 1(c), $\rho = (l_1^2 + l_2^2)^{1/2} / \rho_{max}$, ρ_{max} 是实际晕半径, 取为 120 像素。然后对图像进行灰度变换^[1],

$$i'(m, n) = i(m, n) / i_{ho}(\rho) \times 127, \text{ 对于 } \rho = (m^2 + n^2)^{1/2} / \rho_{max}. \quad (19)$$

$i'(m, n)$ 是消除了衍射晕非均匀照度影响的有噪声的散斑摄影条纹图。

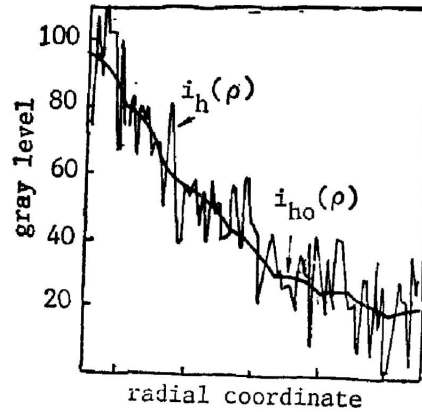


Fig. 2 Gray level distribution of central fringe maximum line,
 $i_h(\rho)$ —initial, $i_{ho}(\rho)$ —smoothing

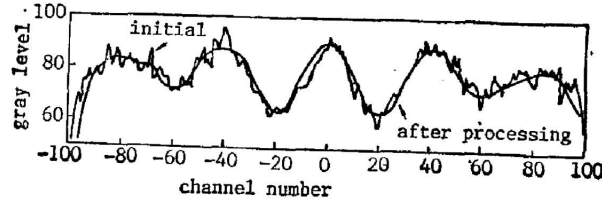


Fig. 3 1-D fringe pattern

4. 条纹压缩

直接对二维的 $i'(m, n)$ 进行傅氏变换是不经济的。为此, 沿着适当间距的平行于条纹方向的直线对条纹进行灰度积分, 并把积分值除以积分路径长度, 便得到了一维条纹图, 见图 3。比较图 2 与图 3 可知, 一维条纹图的信噪比远大于二维条纹图的信噪比, 但噪声依然存在。

5. 滤波及求条纹间距

对一维条纹图进行傅氏变换, 并用(16)式给出的滤波器滤波。处理后的一维条纹图也示于图 3 中。然后根据极大、极小值点来确定条纹间距。

五、结果与讨论

影响条纹间距及方向测量精度的因素主要有 4 个方面: 与信号有关的噪声 i_{0}/i_{m1} , 与信

号无关的噪声 n_2 , 条纹对比度及密度。为对各因素进行全面而又经济的分析, 采用正交实验法。正交实验的目的是选择各因素的有代表性的水平进行组合, 并将这些水平值代入正交表, 研究各因素与结果之间的关系, 以最少量的实验, 得到最多的信息^[5]。本文有 4 个因素, 各因素均取 3 水平, 表 1 是因素水平表。待测函数为条纹方向 θ 及条纹间距 g 的误差 $\delta\theta$ 与 δg 。为了考察 kn_1 与 n_2 之间是否有交互作用, 选取正交表 $L_{27}3^4 = L_{27}3^{13}$ 较合适, N 是实验次数, x 是水平数, y 是可包含的最多因素数目。实验过程及结果归纳于表 2。表中 $A \times B$ 列是 A 、 B 两因素的交互列。 δg_1 是对一维条纹图滤波后的结果, δg_2 是对一维条纹图采取邻域平均的结果。第 1 号实验取 $k\sigma = 0.1$ 、 $\tau = 12$ 、 $\nu = 0.1$ 、 $g = 20$, 得到 $\delta\theta = 1.37^\circ$ 、 $\delta g_1 = 0.4\%$ 、 $\delta g_2 = 1.7\%$, 其余各次实验依此类推。然后计算各输入参数各水平的函数平均值, 比如 A 因素的 I 水平有 9 个实验, 在这些实验中, 其余各因素的不同水平是均衡搭配的, 取 9 个实验结果的算术平均, 得到只与 A 因素 I 水平有关的输出函数 $\bar{\delta\theta} = 1.37^\circ$ 、 $\bar{\delta g}_1 = 1.68\%$ 、 $\bar{\delta g}_2 = 4.58\%$ 。照此办理, 可得到测量误差 $\delta\theta$ 与 δg 对 $k\sigma$ 、 τ 、 ν 、 g 的依存关系。极差是同一因素各水平的最大、最小函数值之差, 它的大小反映该因素在实验给定条件下对输出函数的作用程度。各因素对 $\delta\theta$ 的影响从大到小依次排列为: kn_1 — ν — g — $A \times B$ — n_2 。各因素对 δg 的影响从大到小依次排列为: δg_1 : g — ν — kn_1 — $A \times B$ — n_2 , δg_2 : ν — g — kn_1 — n_2 — $A \times B$ 。总的说来, 影响条纹测量精度的主要因素是条纹间距、对比度和信号有关噪声, kn_1 与 n_2 交互作用很小。比较 δg_1 与 δg_2 可知, 对一维条纹图进行谱面滤波比空域平滑效果好一些。

应该指出, 噪声使得对比度 ν 和间距 g 对测量误差 $\delta\theta$ 与 δg 的影响增大了, 没有噪声时, 这种影响小一些^[1]; 噪声 n_2 降低了条纹的实际对比度; 如果正交实验的因素水平发生变化, 或处理方法不同, 作用大小的排序将会有所改变。

Table 1 The input parameters and level settings

Level	Factor			
	$A(k\sigma)$	$B(\tau)$	$C(\nu)$	$D(g)$
I	0.1	12	0.1	20
II	0.2	25	0.55	40
III	0.3	38	1.0	60

六、结 论

本文分析了散斑摄影条纹图的噪声来源, 提出一种噪声模型, 并从 Wiener-Hopf 滤波器出发, 设计出能消除信号有关噪声和信号无关噪声的低通滤波器。采用正交实验手段, 全面分析了噪声、条纹对比度及密度对条纹测量精度的影响。对模拟的白光散斑摄影条纹图分析表明, 利用我们的算法和程序, 即使在噪声较大、对比度低、条纹稀少、用肉眼很难观测

Table 2 The orthogonal experimental results

Run	Input Parameter						output Function			Run	Input Parameter						output Function		
	A ($k\sigma$)	B (τ)	A \times B	A \times B	C (ν)	D (g)	$\delta\theta$ (degree)	δg_1 (%)	δg_2 (%)		A ($k\sigma$)	B (τ)	A \times B	A \times B	C (ν)	D (g)	$\delta\theta$ (degree)	δg_1 (%)	δg_2 (%)
1	I	I	I	I	I	I	1.37	0.4	1.7	21	III	I	III	II	III	II	1.27	1.0	3.0
2	I	I	I	I	II	II	1.37	2.3	2.7	22	III	II	I	III	I	III	2.66	5.0	17.5
3	I	I	I	I	III	III	1.37	2.8	1.7	23	III	II	I	III	II	I	1.37	1.0	1.9
4	I	II	II	II	I	I	1.37	1.9	0.8	24	III	II	I	III	III	II	1.37	1.7	3.0
5	I	II	II	II	II	II	1.37	0.8	3.7	25	III	III	II	I	I	III	1.37	5.0	16.0
6	I	II	II	II	III	III	1.37	2.8	3.3	26	III	III	II	I	II	I	1.37	0.3	0.0
7	I	III	III	III	I	I	1.37	0.1	1.0	27	III	III	II	I	III	II	1.37	1.8	6.0
8	I	III	III	III	II	II	1.37	1.8	6.0										
9	I	III	III	III	III	III	1.37	2.2	1.7										
10	II	I	II	III	I	II	1.37	2.0	2.5	$\overline{\delta\theta}$	I/9	1.37	1.37	1.51	1.29	1.51	1.31		
11	II	I	II	III	II	III	1.37	2.2	1.7		II/9	1.20	1.43	1.29	1.45	1.48	1.34		
12	II	I	II	III	III	I	0.6	0.4	0.7		III/9	1.60	1.37	1.37	1.43	1.18	1.51		
13	II	I	II	III	III	I	1.37	2.9	3.1	$\Delta\delta\theta$	0.4	0.06	0.22	0.16	0.33	0.20			
14	II	II	III	I	I	II	1.37	2.2	1.7										
15	II	II	III	I	III	I	0.6	0.4	0.4	$\overline{\delta g_1}$ (%)	I/9	1.68	1.82	2.26	2.01	2.98	0.63		
16	II	III	I	II	I	II	1.37	5.0	3.1		II/9	1.91	2.08	1.91	2.10	1.46	2.14		
17	II	III	I	II	II	III	1.37	1.7	4.2		III/9	2.34	2.03	1.77	1.82	1.50	3.17		
18	II	III	I	II	II	III	1.37	1.7	4.2	$\Delta\delta g_1$	0.66	0.26	0.49	0.28	1.52	2.54			
19	III	I	III	II	I	III	1.11	4.5	9.5										
20	III	I	III	II	II	I	1.11	0.8	0.7	$\overline{\delta g_2}$ (%)	I/9	4.58	3.75	5.99	5.40	10.6	2.93		
											II/9	3.77	4.82	6.30	6.72	4.28	3.69		
											III/9	9.03	8.6	4.90	5.00	2.28	10.58		
										$\Delta\delta g_2$	5.26	4.95	1.40	1.72	8.32	7.65			

的恶劣条件下,也能得到合乎实际的结果。

对谷士文副教授无私的支持及陈练兵、沈新权的热情帮助表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 胡逸群;《光学学报》,待发表。
- [2] 张静娟,羊国光;《应用激光》,1987,7, No. 5 (Oct), 226。
- [3] 顾杰,沈永昭;《中国激光》,1987,14, No. 8 (Aug), 490。
- [4] 辻内顺平,村田和美;《光学信息处理》,(机械工业出版社,北京 1985), 89。
- [5] 北京大学数力系数学专业概率统计组;《正交设计》,(人民教育出版社,北京,1976)。

Noise reduction in speckle photography fringe pattern using digital filtering

HU YIQUN

(Research Department, Changsha Railway Institute)

(Received 12 January 1988; revised 21 March 1988)

Abstract

The noise sources and model in speckle photography fringe pattern is discussed and a noise filter for this model is designed. By means of orthogonal experiment, the effects of noise, visibility and fringe density on the measuring accuracy of fringe direction and space are analysed in detail.

Key words: speckle photography fringe pattern; digital filtering; diffraction halo.