第10卷 第3期
1990年3月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 10, No. 3
March, 1990

剪切干涉灵敏度和剪切图的全处理方法的研究*

刘书钢 李振强 刘 宇
(黑龙江大学 分析测试中心,哈尔滨)

提 要

本文对剪切干涉灵敏度进行定量讨论,首次提出平均灵敏度数学模型,它圆满地解释了剪切干涉特性。通过讨论得出一个重要结论,要准确求出待测波面,必须用变剪切干涉仪,使用不同剪切量对同一波面进行测量。然后采用一种新方法——剪切干涉图全处理的方法,求出待测波面。

关键词:波面,变剪切,平均灵敏度,剪切图,全处理。

一、引 言

由于剪切干涉仪以被检波前与其自身的剪切波前所产的干涉条纹来评价被检波前自身的缺陷,所以它不需要参考面[1]。因此,它在大口径反射镜和光学系统检验中得到广泛应用。但是,剪切干涉灵敏度一直是个悬而未解的问题。国内外的参考文献都仅有定性分析而没明确的定义。文献[2]中作者曾提出当剪切量选取合适时,其灵敏度比普通干涉仪高一倍的观点,多数人认为,这个结论仅在特殊情况下成立;不具有普遍意义。

本文利用傅里叶分析法对剪切干涉灵敏度进行讨论,首次提出了用平均灵敏度来描述剪切干涉特性。通过分析可以发现,仅用一种剪切量对波面进行检测不能准确求出待测波面。其原因是与该剪切量有关的某些信息在剪切图上丢失了,剪切量不同丢失的信息成分也不相同。由此得出一个重要结论,要准确求出待测波面,必须用变剪切干涉仪,使用不同的剪切量对同一波面进行测量。然后,利用所给出的新方法——剪切干涉图全处理方法,求解出待测波面。

二、剪切干涉灵敏度探讨

1. 剪切干涉灵敏度

设波面在出瞳处为$W(x)$,出瞳半径规化为1,坐标原点选在出瞳中心,故x的定义域为$[-1, 1]$。实际波面$W(x)$符合没有间断点,每点值唯一的条件,所以它满足收敛定理。故可以利用傅里叶级数展开为

收稿日期:1988年12月12日;收到修改稿日期:1989年10月17日

* 本文曾在第三届全国光学测试交流会(1988年10月)上宣读。

Table 1 Calculated values of shear interferential sensitivity S_{dk}

K \ α	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
1	0.15	0.31	0.46	0.61	0.76	0.90	1.04	1.17	1.29	1.41	1.52	1.61	1.70	1.78	1.84	1.90	1.94	1.97	1.99	1.99
2	0.31	0.61	0.90	1.17	1.41	1.61	1.78	1.90	1.97	1.99	1.97	1.90	1.78	1.61	1.41	1.17	0.91	0.62	0.31	0.00
3	0.46	0.90	1.29	1.61	1.84	1.97	1.99	1.90	1.70	1.41	1.04	0.62	0.16	0.30	0.76	1.17	1.51	1.78	1.94	1.99
4	0.61	1.17	1.61	1.90	1.99	1.90	1.61	1.17	0.62	0.00	0.61	1.17	1.61	1.90	1.99	1.90	1.62	1.18	0.62	0.00
5	0.76	1.41	1.84	1.99	1.84	1.41	0.76	0.00	0.76	1.41	1.84	1.99	1.84	1.41	0.77	0.00	0.75	1.40	1.84	1.99
6	0.90	1.61	1.97	1.90	1.41	0.62	0.30	1.17	1.78	1.99	1.78	1.18	0.31	0.61	1.40	1.89	1.97	1.62	0.91	0.00
7	1.04	1.78	1.99	1.61	0.76	0.30	1.29	1.90	1.94	1.41	0.47	0.61	1.51	1.97	1.85	1.18	0.16	0.89	1.69	1.99
8	1.17	1.90	1.90	1.17	0.00	1.17	1.90	1.90	1.18	0.00	1.16	1.89	1.90	1.18	0.00	1.16	1.89	1.90	1.18	0.01
9	1.29	1.97	1.70	0.62	0.76	1.78	1.94	1.18	0.15	1.40	1.99	1.62	0.47	0.89	1.84	1.90	1.05	0.30	1.51	1.99
10	1.41	1.99	1.41	0.00	1.41	1.99	1.41	0.00	1.40	1.99	1.42	0.00	1.40	1.99	1.42	0.01	1.40	1.99	1.42	0.01
11	1.52	1.97	1.04	0.61	1.84	1.78	0.47	1.16	1.99	1.42	0.14	1.61	1.94	0.91	0.75	1.89	1.71	0.32	1.28	1.99
12	1.61	1.90	0.62	1.17	1.99	1.18	0.61	1.89	1.62	0.00	1.61	1.90	0.62	1.16	1.99	1.18	0.60	1.89	1.62	0.01
13	1.70	1.78	0.16	1.61	1.84	0.31	1.51	1.90	0.47	1.40	1.94	0.62	1.28	1.97	0.77	1.16	1.99	0.92	1.02	1.99
14	1.78	1.61	0.30	1.90	1.41	0.61	1.97	1.18	0.89	1.99	0.91	1.16	1.97	0.63	1.40	1.90	0.33	1.60	1.79	0.02
15	1.84	1.41	0.76	1.99	0.77	1.40	1.85	0.00	1.84	1.42	0.75	1.99	0.77	1.40	1.85	0.01	1.83	1.42	0.74	1.99
16	1.90	1.17	1.17	1.90	0.00	1.89	1.18	1.16	1.90	0.01	1.89	1.18	1.16	1.90	0.01	1.89	1.19	1.15	1.90	0.02
17	1.94	0.91	1.51	1.62	0.75	1.97	0.16	1.89	1.05	1.40	1.71	0.60	1.99	0.33	1.83	1.19	1.28	1.79	0.44	1.99
18	1.97	0.62	1.78	1.18	1.40	1.62	0.89	1.90	0.30	1.99	0.32	1.89	0.92	1.60	1.42	1.15	1.79	0.59	1.97	0.02

19	1.99	0.31	1.94	0.62	1.84	0.91	1.69	1.18	1.51	1.42	1.28	1.62	1.02	1.79	0.74	1.90	0.44	1.97	0.12	1.99
20	1.99	0.00	1.99	0.00	1.99	0.00	1.99	0.01	1.99	0.01	1.99	0.01	1.99	0.02	1.99	0.02	1.99	0.02	1.99	0.03
21	1.99	0.30	1.94	0.61	1.85	0.89	1.71	1.16	1.53	1.40	1.31	1.60	1.06	1.77	0.78	1.89	0.49	1.97	0.18	1.99
22	1.97	0.61	1.78	1.16	1.42	1.61	0.91	1.89	0.32	1.99	0.29	1.90	0.88	1.63	1.39	1.19	1.76	0.64	1.96	0.03
23	1.94	0.90	1.52	1.61	0.77	1.97	0.14	1.90	1.03	1.42	1.69	0.63	1.99	0.28	1.85	1.15	1.32	1.76	0.50	1.99
24	1.90	1.17	1.18	1.39	0.00	1.90	1.16	1.18	1.89	0.01	1.90	1.15	1.19	1.89	0.02	1.91	1.14	1.20	1.89	0.03
25	1.84	1.41	0.77	1.99	0.75	1.42	1.84	0.01	1.85	1.40	0.78	1.99	0.74	1.43	1.83	0.03	1.86	1.38	0.80	1.99
26	1.78	1.61	0.31	1.90	1.40	0.62	1.97	1.16	0.92	1.99	0.88	1.19	1.97	0.59	1.43	1.89	0.27	1.63	1.76	0.04
27	1.70	1.78	0.15	1.62	1.84	0.30	1.53	1.89	0.44	1.42	1.93	0.59	1.32	1.97	0.73	1.20	1.99	0.87	1.07	1.99
28	1.61	1.90	0.61	1.18	1.99	1.16	0.63	1.90	1.60	0.02	1.63	1.89	0.59	1.20	1.99	1.14	0.65	1.91	1.59	0.04
29	1.52	1.97	1.03	0.62	1.85	1.77	0.45	1.19	1.99	1.39	0.18	1.63	1.93	0.87	0.79	1.91	1.68	0.27	1.33	1.99
30	1.14	1.99	1.40	0.00	1.42	1.99	1.40	0.01	1.42	1.99	1.39	0.02	1.43	1.99	1.38	0.05	1.44	1.99	1.38	0.04
31	1.30	1.97	1.70	0.06	0.77	1.78	1.94	1.15	0.17	1.43	1.99	1.60	0.43	0.93	1.86	1.88	1.00	0.35	1.55	1.99
32	1.17	1.90	1.89	1.16	0.01	1.18	1.90	1.89	1.15	0.02	1.19	1.91	1.89	1.14	0.03	1.20	1.91	1.88	1.13	0.05
33	1.04	1.78	1.99	1.61	0.75	0.32	1.31	1.90	1.93	1.39	0.43	0.64	1.54	1.98	1.83	1.14	0.11	0.94	1.73	1.99
34	0.91	1.62	1.97	1.89	1.40	0.60	0.33	1.19	1.79	1.99	1.76	1.14	0.27	0.65	1.44	1.91	1.96	1.58	0.86	0.05
35	0.76	1.41	1.85	1.99	1.84	1.40	0.74	0.02	0.78	1.43	1.85	1.99	1.83	1.38	0.72	0.04	0.80	1.44	1.86	1.99
36	0.62	1.18	1.62	1.90	1.99	1.89	1.60	1.15	0.59	0.02	0.64	1.20	1.63	1.91	1.99	1.88	1.58	1.13	0.56	0.05
37	0.46	0.91	1.30	1.62	1.85	1.97	1.99	1.89	1.69	1.39	1.01	0.58	0.11	0.35	0.80	1.21	1.55	1.80	1.95	1.99
38	0.31	0.62	0.91	1.18	1.42	1.62	1.79	1.90	1.97	1.99	1.96	1.89	1.76	1.59	1.38	1.13	0.86	0.56	0.25	0.06
39	0.16	0.31	0.47	0.62	0.77	0.92	1.06	1.19	1.32	1.43	1.54	1.63	1.72	1.80	1.86	1.91	1.95	1.98	1.99	1.99
40	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06

$$\left.\begin{aligned} W(x) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k}^{N} A_k \sin(k\pi x + \alpha_k), \\ A_k &= \sqrt{a_k^2 + b_k^2},\ \alpha_k = \tan^{-1}\left(\frac{a_k}{b_k}\right)。 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

(1)式的物理意义是把任意波差分布看成是频率各不相同的正弦函数叠加。振幅 A_k 表示各频率波差变化的幅值。在有参考面的干涉图上，A_k 就是程差分布。按剪切干涉原理，剪切图上所表示的程差分布为：

$$\left.\begin{aligned} \Delta W(x,\ d) &= W(x) - W(x-d) \\ &= \sum_{k=1}^{N} A_k' \cos\left[k\pi\left(x - \frac{d}{2}\right) + \alpha_k\right], \\ A_k' &= 2\sin(k\pi d/2)\cdot A_k, \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中 d 为剪切量 ($d\leqslant 1$)，A_k' 为剪切图上波面不同频率成份的程差分布。我们定义剪切干涉灵敏度为剪切图上所表示波面的变形量与具有参考波面干涉图上所表示波面变形量之比，比值用 $S_{d\cdot k}$ 表示。剪切干涉灵敏度 $S_{d\cdot k}$ 的值为

$$S_{d\cdot k} = \left|\frac{A_k'}{A_k}\right| = \left|2\sin\frac{k\pi d}{2}\right|, \tag{3}$$

式中下标 $d\cdot k$ 表示它是 d 和 k 的函数，表 1 是 $S_{d\cdot k}$ 的取值表。下面对 $S_{d\cdot k}$ 进行具体分析。

(1) $d=0$

从(3)式知，$S_{d\cdot k}=0$ 这说明剪切量为零时，无论波面有什么缺陷，在剪切图上都没有任何反映，故灵敏度为零。

(2) $d=\frac{2n+1}{k},\ n\leqslant\frac{k}{2}$。 $(k=1,\ 2,\ \cdots,\ N)$

把 d 的值代入(3)式得 $S_{d\cdot k}=2$。这表示剪切图上的波面条纹变形大于普通干涉图上的条纹变形量。此时灵敏度最高(注意：$S_{d\cdot k}=2$ 仅对单频率成立，不是整个波面)。

(3) $d=\frac{2n}{k},\ n\leqslant\frac{k}{2}$。$(k=1,\ 2,\ \cdots,\ N)$

把 d 的值代入(3)式得，$S_{d\cdot k}=0$。这表示与剪切量 $d=(2n/k)$ 有关的波面信息在剪切图上没有任何反映，故灵敏度为零。这说明，剪切量只取单一值时，干涉图上的某些信息可能丢失。例如，$d=0.4$ 时，$S_{0.4\cdot 5}$，$S_{0.4\cdot 10}$，$S_{0.4\cdot 15}$，…，均为零。显然这对波面重构是不利的，尤其是高精度测量。因此，剪切量应连续取不同值，然后将所得结果进行拟合。这就解决了剪切量取单值丢信息带来的误差问题。这是本文得出的重要结论之一，后面将给出波面求解的具体方法。

2. 平均灵敏度的定义

从表 1 可以清楚看出，灵敏度与剪切量 d 和频率 k 有关。但是，(3)式所表示的灵敏度有一个问题，即它仅仅反映 k 次谐波的灵敏度，不能评价整个波面的灵敏度。而我们最关心的是单个频率叠加后对于整个波面的灵敏度，称它为平均灵敏度，以 $S_{d\cdot a}$ 表示。显然，平均灵敏度 $S_{d\cdot a}$ 应满足下列几个条件：

(1) $d=0$ 时，$S_{d\cdot a}=0$

(2) $d=1$ 时，$S_{d\cdot a}=0$

(3) $S_{d\cdot a}\leqslant 2$

Table 2 Calculted values of average sensitivity $S_{d\cdot a}$ as $l=0.12$

K \ α	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24
1	0.25	0.50	0.74	0.95	1.15	1.32	1.47	1.59	1.68	1.73	1.76	1.75	1.72	1.66	1.57	1.45	1.31	1.16	0.98	0.80	0.60	0.40	0.20	0.00
2	0.30	0.59	0.84	1.05	1.21	1.32	1.39	1.43	1.58	1.69	1.75	1.75	1.71	1.61	1.47	1.31	1.24	1.16	1.03	0.88	0.69	0.47	0.24	0.00
3	0.33	0.63	0.87	1.05	1.18	1.32	1.41	1.43	1.55	1.64	1.74	1.75	1.70	1.57	1.45	1.31	1.26	1.16	1.01	0.87	0.71	0.51	0.26	0.00
4	0.36	0.66	0.87	1.05	1.19	1.32	1.39	1.44	1.55	1.62	1.72	1.75	1.69	1.55	1.45	1.31	1.24	1.16	1.02	0.87	0.71	0.52	0.28	0.00
5	0.37	0.66	0.87	1.05	1.18	1.32	1.39	1.42	1.55	1.62	1.71	1.75	1.68	1.55	1.45	1.30	1.24	1.16	1.01	0.88	0.71	0.53	0.29	0.00
6	0.38	0.66	0.88	1.05	1.19	1.32	1.39	1.42	1.54	1.62	1.70	1.75	1.67	1.55	1.44	1.30	1.24	1.16	1.01	0.88	0.72	0.53	0.30	0.00
7	0.39	0.66	0.88	1.05	1.19	1.12	1.39	1.43	1.54	1.62	1.70	1.75	1.66	1.55	1.44	1.30	1.24	1.16	1.01	0.88	0.72	0.53	0.31	0.00
8	0.40	0.67	0.88	1.06	1.19	1.32	1.39	1.42	1.54	1.62	1.69	1.75	1.65	1.55	1.44	1.30	1.24	1.16	1.01	0.88	0.72	0.53	0.31	0.00
9	0.40	0.67	0.88	1.06	1.19	1.32	1.39	1.42	1.54	1.62	1.69	1.75	1.65	1.55	1.44	1.30	1.24	1.16	1.01	0.88	0.72	0.53	0.31	0.00
10	0.40	0.67	0.88	1.06	1.19	1.32	1.39	1.42	1.54	1.61	1.69	1.75	1.65	1.54	1.44	1.30	1.24	1.16	1.01	0.88	0.72	0.54	0.31	0.00

(4) d=波面周期时，$S_{d\cdot a}=0$

(5) d=波面周期一半时，$S_{d\cdot a}$=最大

按照上述几个条件，我们定义平均灵敏度 $S_{d\cdot a}$ 为

$$S_{d\cdot a}=\frac{\sum\limits_{k=1}^{N}S_{d\cdot k}A_k}{\sum\limits_{k=1}^{N}}\cdot L(d), \tag{4}$$

式中 $L(d)$ 是权函数，它可以取各种形式。$L(d)$ 是 d 的减函数，它限制剪切量过大而灵敏度仍很高这一不符合实际的问题。$L(d)$ 应满足边界条件，$d=1$ 时 $L(d)=0$，即两剪切波面不相交时灵敏度为零。在下面的讨论中，取 $L(d)=1-d$，则(4)式为

$$S_{d\cdot a}=\frac{\sum\limits_{k=1}^{N}S_{d\cdot n}A_k}{\sum\limits_{k=1}^{N}A_k}(1-d), \tag{5}$$

它的物理意义是每一频率的剪切波面程差分布之和与有参考波面的波面程差分布的每一频率之和之比，再乘上权函数。

为了验证(5)式的定义是正确的，可用已知波面进行验证。表 2 是周期为 $2l$ 的三角形波面的平均灵敏度 $S_{d\cdot a}$ 的数值表。通过详细讨论可知，定义 (5) 式完全符合所给的边界条件。从表 2 也清楚看出，平均灵敏度的值只取前几项已趋于稳定，这也说明定义是合理的。

三、剪切干涉图的全处理

目前，国内外所使用的方法都是对一种剪切量的干涉图进行处理。根据前面对剪切干涉灵敏度分析知，仅用一种剪切量对波面进行处理，不能准确求出待测波面。其原因是某些信息成份在剪切图上丢掉了，剪切量不同，丢掉的信息成份也不相同。因此，要准确求出待测波面，必须对同一波面的不同剪切量的干涉图进行处理，求出波面。下面讨论多剪切量干涉图的波面求解方法——剪切干涉图的全处理方法。

1. 波面表示

设波面在出瞳处以第一类 Tchebyshev 多项式表示为

$$W(x)=\sum_{i=1}^{n}A_iT_i(x), \tag{6}$$

按剪切干涉原理，m 张剪切图上所表示的程差分布为

$$N_j(x)\lambda=W_j(x-s_j)-W_j(x)=\sum_{i=1}^{n}A_{ji}[T_i(x-s_j)-T_i(x)], \tag{7}$$

式中 $N_j(x)$ 表示第 j 张干涉图上 x 处的干涉级，λ 为光波长，s_j 为第 j 张干涉图上的剪切量，$j=1, 2, \cdots, m$，利用剪切干涉图处理方法[4]，对(7)式分别求解，可以得出 m 个波面，即

$$W_j(x)=\sum_{i=1}^{n}A_{ji}T_i(x)+D_jx^2+K_jx+M_j。\quad (j=1,\ 2,\ \cdots,m) \tag{8}$$

因为，每一种剪切量的剪切图上都要丢掉与剪切量有关的某些信息。所以根据每一种剪切

量求得的波面 W_j 都是不同的，与实际波面有差异。现在的问题是根据(8)式中 m 个 W_j 求出与实际波面最为吻合的波面。

2. 波面正交过程

为了求解方便，把(8)式转化为在求解区间[0, 1]上的正交多项式：

$$W_j(x)=\sum_{i=0}^{n}B_{ji}\varphi_i(x)+D_jx^2+K_jx+M_j, \tag{9}$$

$\varphi_i(x)$ 在[0, 1]区间上为正交多项式，且权函数 $\rho(x)$ 为 1，它与 $T_i(x)$ 的对应关系为

$$\left.\begin{array}{l} T_0(x)=\varphi_0(x), \\ T_1(x)=\varphi_1-C_{10}\varphi_0, \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ T_n(x)=\varphi_n-C_{10}\varphi_0-C_{01}\varphi_1-\cdots-C_{n(n-1)}\varphi_{(n-1)}。 \end{array}\right\} \tag{10}$$

把(10)式代入(9)式后比较即可得出正交后的多项式函数为

$$B_{ji}=A_{ji}-\sum_{k=i+1}^{n}A_{jk}C_{ki}, \tag{11}$$

对(9)式中附加项作如下变换

$$\left.\begin{array}{l} x^2=\dfrac{T_2+1}{2}=\dfrac{\varphi_2-C_{20}\varphi_0-C_{21}\varphi_1+1}{2}, \\ x=\varphi_1-C_{10}\varphi_0, \quad 1=\varphi_0, \end{array}\right\} \tag{12}$$

把(12)式代入(9)式整理得

$$W_j=\sum_{i=0}^{n}O_{ji}\varphi_i(x), \quad (j=1, 2, \cdots, n) \tag{13}$$

$$\left.\begin{array}{l} O_{j0}=B_{j0}+\dfrac{1}{2}(1-C_{20})D_j-k_jC_{10}+M_j, \\ O_{j1}=B_{j1}+k_j-\dfrac{1}{2}D_jC_{21}, \\ O_{j2}=B_{j2}+\dfrac{1}{2}D_j, \\ O_{ji}=B_{ji}。\quad (i>2) \end{array}\right\} \tag{14}$$

3. 波面拟合

设所求实际波面为

$$W(x)=\sum_{i=0}^{n}\mathscr{A}_i\varphi_i(x)。 \tag{15}$$

现在的问题是要利用正交后 m 个已知波面(13)式，求出实际波面函数 $\mathscr{A}_i$。按最小二乘及最佳均方逼进处理，(13)式中 W_j 应满足[5]

$$I=\int_0^1\sum_{j=1}^{m}\left(W_j-\sum_{i=0}^{n}\mathscr{A}_i\varphi_i\right)^2dx=\text{最小。} \tag{16}$$

将(16)式展开整理得

$$\left.\begin{aligned} I=\sum_{j=1}^{m}(W_j,\ W_j)-2\sum_{i=0}^{n}(W_j,\ \varphi_i)\mathscr{A}_i+\sum_{k=0}^{n}\sum_{i=0}^{n}(\varphi_k,\ \varphi_i)\mathscr{A}_k\mathscr{A}_i, \\ (W_j,\ W_j)=\int_0^1 W_jW_j\,dx, \\ (W_j,\ \varphi_i)=\int_0^1 W_j\varphi_i\,dx, \\ (\varphi_k,\ \varphi_i)=\int_0^1 \varphi_k\varphi_i\,dx, \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

为了求出满足(16)式的波面函数，对 I 分别求 $\mathscr{A}_i$ 偏导数并令其为零，即

$$\frac{\partial I}{\partial \mathscr{A}_i}=\sum_{j=1}^{m}\left[\sum_{k=0}^{n}(\varphi_k,\ \varphi_i)\mathscr{A}_k-(W_j,\ \varphi_i)=0\right]。(i=0,\ 1,\ \cdots,n) \tag{18}$$

(18)式是 $\mathscr{A}_i$ 的 $n+1$ 元线性方程组，利用 φ_i 的正交性质，可直接求出波面函数 $\mathscr{A}_i$。化简(18)式得

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=0}^{n}(\varphi_k,\ \varphi_i)\mathscr{A}_k=\sum_{j=1}^{m}(W_j,\ \varphi_i)。 \tag{19}$$

从(19)式解出

$$\mathscr{A}_k=\frac{1}{m}\frac{\sum_{j=1}^{m}(W_j,\ \varphi_k)}{(\varphi_k,\ \varphi_k)}。\quad (k=0,\ 1,\ 2,\ \cdots,n) \tag{20}$$

把(17)式中系数代入(20)式，化简得

$$\mathscr{A}_k=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}O_{ji}。\quad (i=0,\ 1,\ 2,\cdots,n) \tag{21}$$

通过上述计算过程，即可求出波面(15)式中的系数。

4. 实验数据的处理

为了表明这种方法的可行性，按上述原理编写了计算程序。表3是一块反映镜的实际波面处理后的模拟数据。数据共有4组(3组模拟)每一组波面表达式(8)式中的各项系数见表前五行，最后一行是拟合出的波面表达式(15)式中的系数 $\mathscr{A}_i$。

Table 3 The result by processing simulated data of a mirror

	0	1	2	3	4	D	K	M
1	0.00000000	0.36814343	−0.26756990	0.00194727	−0.00003397	0.46960795	−0.13978843	−0.42018195
2	0.00000000	0.33684743	−0.25715997	0.00196725	−0.00003354	0.48750765	−0.14987642	−0.44103245
3	0.00000000	0.38825914	−0.27456770	0.00198727	−0.00003404	0.44750885	−0.14079945	−0.45000294
4	0.00000000	0.35772543	−0.25487440	0.00194798	−0.00003346	0.47910476	−0.13574463	−0.41991815
	−0.15922680	0.22669010	−0.25479886	0.00182743	−0.00003375			

四、结 束 语

本文首次给出了剪切干涉灵敏度定量计算公式，它较圆满解释了剪切特性。通过分析还发现低频谐波贡献大，灵敏度随 k 值增大很快趋于稳定。进次谐波对平均灵敏度贡献小，

可以忽略。通过对大量的实际波面进行计算，平均灵敏度的值都在1左右，这是合乎实际的。

通过对灵敏度的讨论得出一个重要结论，要准确重构波面，必须用变剪切干涉仪使用不同的剪切量对同一波面进行测量。然后使用本文提出的剪切干涉图全处理方法求出待测波面。该方法对于高精度的光学系统测量具有很重要的意义。例如，自适应光学系统中的波面探测是采用剪切干涉仪完成的，一旦从实际上解决了剪切量连续可调的问题，把变剪切干涉仪用于自适应光学中，一定能使系统精度得到进一步的提高。

本工作曾得到中国科学院光电技术研究所宋从武研究员指导，再此表示感谢。

参考文献

[1] D. Malacam; «*Optical Shop Testing*», (New York, 1978), Ch. 4.
[2] 徐德衍;«剪切干涉仪及其应用»,(机械工业出版社,1987), 111。
[3] 刘书钢;«光学学报»,1986, **6**, No. 11 (Nov), 1050。
[4] 白玉山;«计算方法»,(辽宁人民出版社,1984),231。

Sensitivity of lateral shear interference and full-processing of lateral shear interferograms

LIU SHUGANG, LI ZENQIANG AND LIU YU
(*Heilongjiang University, Harebing*)

(Received 12 December 1988; revised 17 October 1989)

Abstract

The sensitivity of lateral shear interference is quantitatively discussed and the model of average sensitivity is presented, it can explain the theory of lateral shear interference completely. The important result has been obtained that if a tested wavefront is to be reconstructed correctly, we had better use a variable shear interferometer to test it, that is, using more than one shear to test the same wavefront. Then, the tested wavefront can be solved with a new method-Fullprocessing of Lateral Shear Interferograms.

Key words: wavefront, variable shear, average sensitivity, shear interferograms, Full-processing.