

基于 $\pi/4$ 相移平均的多光束干涉相位提取算法

袁 群 高志山 李建欣 周宇轩 褚 光

(南京理工大学工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 菲佐干涉仪中如存在多光束干涉现象,干涉光强将不再是严格的余弦分布形式。在导出菲佐干涉仪中多光束干涉光强公式的基础上,给出了将其近似为理想多光束干涉光强公式的条件。推导了对多光束相移干涉图用四幅算法求解的相位计算误差,并据此提出了基于 $\pi/4$ 相移平均的多光束干涉相位提取算法:通过采集相移间隔 $\pi/4$ 的两组干涉图序列,将两次计算得到的相位值平均来抑制由多光束干涉引入的误差。在存在相移随机误差的条件下,模拟了参考面具有不同反射系数时的相位计算误差。用菲佐干涉仪检测反射系数较高的反射镜,采集 22 幅相移干涉图计算波面数据,结果表明:常规相移算法计算得到的波面数据中存在明显的 4 倍条纹周期的波纹误差,而采用基于重叠四步平均法的 $\pi/4$ 相移平均方法可以有效地抑制多光束干涉造成的波纹误差影响。

关键词 测量;菲佐干涉仪;多光束干涉;相移;平均

中图分类号 TN21 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1112004

Phase Extraction Algorithms of Multi-Beam Interference Based on $\pi/4$ Phase-Shifting Averaging

Yuan Qun Gao Zhishan Li Jianxin Zhou Yuxuan Chu Guang

(Institute of Electrical Engineering & Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The interference intensity is not strictly cosine distribution if multi-beam interference exists in Fizeau interferometer. Based on the formula of interference intensity in Fizeau interferometer, the conditions to make the interference intensity in Fizeau interferometer be approximated as the ideal formula of multi-beam interference are brought. The calculated phase errors of 4-frame phase-shifting algorithms when using multi-beam interferograms are derived, and phase extraction algorithms of multi-beam interference based on $\pi/4$ phase-shifting averaging are proposed: two sequences of phase-shifting interferograms with $\pi/4$ interval are collected, and the two calculated phases obtained from the two sequences are averaged to suppress the error induced by multibeam interference. The calculated phase errors for test surfaces with different reflection coefficients are numerically simulated in the condition of random phase-shifting errors. A mirror with high reflection coefficient is tested by Fizeau interferometer, and 22 frames of interferograms are captured to calculate the wavefront map. The results indicate that ripple errors at 4 times the modulation frequency of fringes exist in the calculated phase when using routine phase-shifting algorithms, while the proposed $\pi/4$ phase-shifting averaging method based on the overlapping averaging 4-frame algorithm can efficiently suppress the phase error caused by multi-beam interference.

Key words measurement; Fizeau interferometer; multi-beam interference; phase shifting; averaging

OCIS codes 120.3940; 120.3180; 120.2230; 120.5050

1 引 言

目前的干涉测量方法一般是采集多幅相移干涉

图,根据双光束干涉光强的余弦分布特性,利用相移算法计算相位。但在实际情况下,如法布里-珀罗

收稿日期: 2011-04-11; **收到修改稿日期**: 2011-05-30

基金项目: 教育部博士学科专项科研基金(20103219110014)、江苏省社会发展基金(BS2007061)和中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室基金(KF020109207)资助课题。

作者简介: 袁 群(1986—),男,博士研究生,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: karmen86913@126.com

导师简介: 高志山(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事光学测试、光学设计、眼视光学等方面的研究。

E-mail: zhishgao@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

(F-P)干涉仪、菲佐干涉仪的干涉腔中,由于光束经过多次反射形成多光束干涉,干涉光强并不是严格的余弦分布形式。国内外的一些研究人员^[1-6]已经根据理想的多光束干涉光强公式提出了一些抑制由多光束干涉引入的相位计算误差的相移算法。而实践中,每一步的相移量会相对理论值有一定的偏差,并且由于载频条纹的存在,参考面与被测面之间存在一定的夹角,菲佐干涉仪的干涉光强不严格等同于理想的多光束干涉光强形式。本文针对上述问题,推导了菲佐干涉仪中的干涉光强公式并给出了近似条件,同时通过数值模拟,提出了基于现有相移算法的平均方法,在存在相移误差的情况下,抑制了多光束干涉造成的相位计算误差。

2 多光束干涉的原理

2.1 理想的多光束干涉光强公式

理想的多光束干涉可以由 F-P 干涉仪的工作原理推导,如图 1 所示,参考面 R 与被测面 T 平行,多光束干涉光强可由艾里公式^[7]表示为

$$I = I_0 \left(1 - \frac{1}{1 + F_1 - F_2 \cos \phi} \right), \quad (1)$$

式中 I_0 表示入射光强, ϕ 表示待测相位分布, F_1 和 F_2 由参考面和被测面的反射系数 r_1, r_2 决定:

$$F_1 = \frac{r_1^2 + r_2^2}{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)}, \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{2r_1 r_2}{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)}. \quad (3)$$

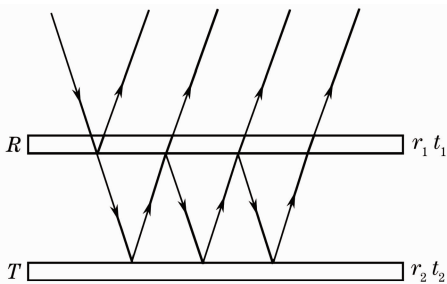


图 1 理想的多光束干涉原理图

Fig. 1 Principle of ideal multi-beam interference

由(1)式可知,多光束干涉的光强是关于待测相位 ϕ 周期分布的偶函数,当 $r_1 r_2 \ll 1$ 时,仅考虑光线在被测面上的一次反射,可以得到双光束干涉的光强

$$I = I_0 [r_1^2 + (1 - r_1^2)^2 r_2^2 + 2(1 - r_1^2) r_1 r_2 \cos \phi]. \quad (4)$$

2.2 菲佐干涉仪中的多光束干涉光强公式

实践中由于参考面与被测面之间不可能被调整

到严格平行,所以有载频条纹的存在。图 2 所示为菲佐干涉仪干涉腔中的光路,参考面 R 与被测面 T 之间的楔角为 α , O 点为楔角的顶点。考察参考面上某点 S 处干涉条纹的形成, A_1, A_2, \dots, A_n 为以某一角度入射的一束平行光,它们最终经过多次反射会聚到 S 点形成干涉, B_1, B_2, \dots, B_n 为与之对应的出射光线, S 点处参考面 R 与被测面 T 的间距为 H 。 A_1 光线的入射角为 θ_1 , 则 B_1 光线的出射角也为 θ_1 , B_n 光线的出射角为 θ_n 。过顶点 O 分别作光线 B_1, B_2, \dots, B_n 的垂线, P_1, P_2, \dots, P_n 为与之对应的垂足。在顶点 O 处,经过多次反射的各光线等光程, OP_1, OP_2, \dots, OP_n 分别为出射光线 B_1, B_2, \dots, B_n 的波前,所以出射光线上 P_1, P_2, \dots, P_n 点的光程相等。

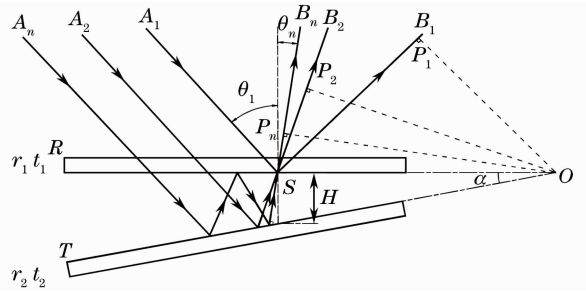


图 2 菲佐干涉仪中的多光束干涉原理图

Fig. 2 Principle of multi-beam interference in Fizeau interferometer

第 n 条出射光线 B_n 和第 1 条出射光线 B_1 在 S 点处的光程差可以由几何关系得到

$$\delta_n = SP_1 - SP_n = OS (\sin \theta_1 - \sin \theta_n). \quad (5)$$

第 n 条出射光线 B_n 在被测面 T 上经过 $n-1$ 次反射,其出射角 θ_n 与干涉腔的楔角有关:

$$\theta_n = \theta_1 - 2(n-1)\alpha. \quad (6)$$

再将 $OS = H/\tan \alpha$ 代入(5)式,相位差可以表示成

$$\phi_n = \frac{2\pi\delta_n}{\lambda} = \frac{2\pi H (\sin \theta_1 - \sin \theta_n)}{\lambda \tan \alpha}. \quad (7)$$

假设入射光束的振幅为 A_0 , 则第 1 条出射光线 B_1 的振幅为 $r_1 A_0$, 第 n 条出射光线 B_n 在参考面 R 与被测面 T 上分别经过 $n-2$ 次和 $n-1$ 次反射, 并且 2 次透射经过参考面 R , 第 n 条出射光线的振幅为

$$A_n = (1 - r_1^2) r_1^{n-2} r_2^{n-1} A_0. \quad (8)$$

第 n 条出射光线 B_n 中由半波损失引入 $(2n-3)\pi$ 大小的相位变化, 所以 S 点处多光束干涉的合振幅为

$$A_R = A_0 \left\{ r_1 + \frac{1 - r_1^2}{r_1 r_2} \sum_{n=2}^{\infty} (r_1 r_2)^n \exp \{ i[\phi_n + 2(n-3)\pi] \} \right\}. \quad (9)$$

则 S 点处多光束干涉的光强可以表示为

$$I_R = I_0 r_1^2 \left[\frac{r_1^4 + r_1^2 r_2^2 (1 - 2r_1^2)}{r_1^2 (1 - r_1 r_2)} - \frac{2(1 - r_1^2)}{r_1^3 r_2} \sum_{n=2} (r_1 r_2)^n \cos \phi_n + \frac{2(1 - r_1^2)^2}{r_1^6 r_2^2} \sum_{i=2} \sum_{j=i+1} (r_1 r_2)^{i+j} \cos \phi_{ij} \right], \quad (10)$$

$$\text{式中 } \phi_{ij} = \frac{2\pi\delta_n}{\lambda} = \frac{2\pi H(\sin \theta_i - \sin \theta_j)}{\lambda \tan \alpha}.$$

2.3 菲佐干涉仪中的多光束干涉近似

菲佐干涉仪中光线一般垂直于参考面 R 入射，所以出射角 $\theta_i = 0^\circ$ ，并且楔角 α 较小满足 $\tan \alpha = \alpha$ ，将上述条件代入(5)式并用级数展开得

$$\delta_n = \frac{H \sin 2(n-1)\alpha}{\alpha} = 2(n-1)H - \frac{4}{3}(n-1)^3 \alpha^2 H. \quad (11)$$

$\delta_n = 2(n-1)H$ 即为理想的多光束干涉时光程差，所以当(11)式中的第二项 $\frac{4}{3}(n-1)^3 \alpha^2 H$ 足够小时，即为艾里公式的求解过程^[7]，菲佐干涉仪中多光束干涉的光强公式(10)式可以简化为理想的多光束干涉光强公式(1)式。光线在被测面上的反射次数 $n-1$ 、楔角 α 以及干涉腔长 H 决定(11)式中第二项的大小，光线的反射次数与参考面和测试面的反射系数有关。

在以 He-Ne 激光($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)为光源，口径 $\Phi 100 \text{ mm}$ 的非佐干涉仪中，若干涉图载频为 3 根条纹，则参考面 R 与被测面 T 之间干涉腔的楔角 $\alpha = 5.44 \times 10^{-6}^\circ$ 。图 3 为根据(10)式通过数值模拟计算得到的多光束干涉光强分布，横坐标为待测相位分布，纵坐标为归一化光强，实线为菲佐干涉仪中多光束干涉光强，虚线为理想的多光束干涉光强。参考面为石英玻璃，反射系数 $r_1 = 0.2$ 。图 3(a)图中被测面的反射系数 $r_2 = 0.2$ ，干涉腔长 $H = 20000\lambda$ ；图 3(b)中被测面的反射系数 $r_2 = 0.6$ ，干涉腔长 $H = 20000\lambda$ ；图 3(c)中被测面的反射系数 $r_2 = 0.7$ ，干涉腔长 $H = 30000\lambda$ 。图 3(a)和(b)中两光强曲线基本重合，反射系数增大时，光线的反射次数增多，光强的余弦性进一步遭到破坏。图 3(c)中反射系数和干涉腔长 H 均比图 3(a)和(b)中的大，菲佐干涉仪中的多光束干涉光强曲线与理想的多光束干涉光强曲线有偏差，已不再是近似余弦分布的形式。

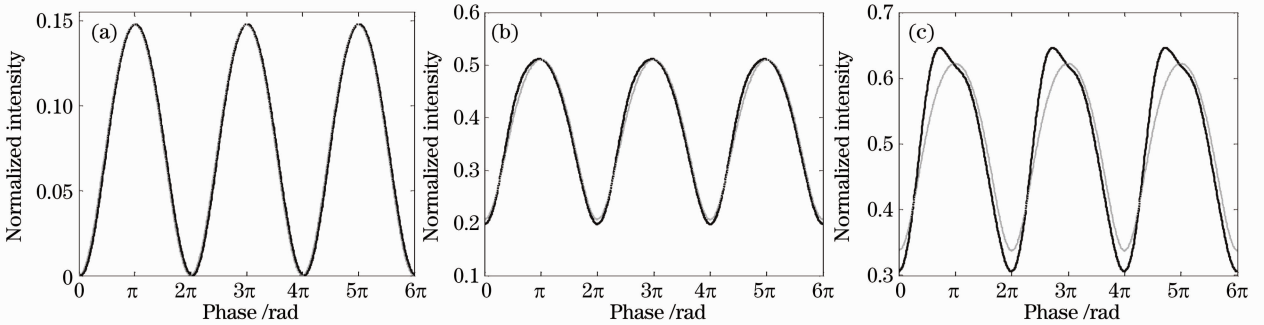


图 3 基于数值模拟的多光束干涉光强。(a) $r_2 = 0.2$, $H = 20000\lambda$ ；(b) $r_2 = 0.6$, $H = 20000\lambda$ ；(c) $r_2 = 0.7$, $H = 30000\lambda$

Fig. 3 Intensity of multi-beam interference based on numerical simulation. (a) $r_2 = 0.2$, $H = 20000\lambda$;

(b) $r_2 = 0.6$, $H = 20000\lambda$; (c) $r_2 = 0.7$, $H = 30000\lambda$

实际干涉测量中，参考面 R 与被测面 T 的楔角 α 一般很小(载频条纹 2~3 条)，干涉腔长 H 也可小于 10 mm (约 16000λ)，所以(11)式中的 $\frac{4}{3}(n-1)^3 \alpha^2 H$ 项很小，其对多光束干涉光强分布的影响可以忽略不计。菲佐干涉仪中多光束干涉光强可以由理想的多光束干涉光强公式(1)式近似表示。

3 相移算法

3.1 相位计算误差

在多光束干涉条件下，相移间隔 $\pi/2$ 的 4 幅干涉图的光强为

$$\begin{cases} I_1 = I_0 \left(1 - \frac{1}{1 + F_1 - F_2 \cos \phi} \right) \\ I_2 = I_0 \left(1 - \frac{1}{1 + F_1 - F_2 \sin \phi} \right) \\ I_3 = I_0 \left(1 - \frac{1}{1 + F_1 + F_2 \cos \phi} \right) \\ I_4 = I_0 \left(1 - \frac{1}{1 + F_1 + F_2 \sin \phi} \right) \end{cases}. \quad (12)$$

用传统四幅算法计算得到的相位 ϕ' 与待测相位 ϕ 的关系为

$$\tan \phi' = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{(1 + F_1)^2 - F_2^2 \cos^2 \phi}{(1 + F_1)^2 - F_2^2 \sin^2 \phi} \tan \phi. \quad (13)$$

相位计算误差 $\Delta\phi$ 可以由(13)式得到

$$\Delta\phi = \phi - \phi' = \arctan \frac{F_2^2 \sin 4\phi}{4(1+F_1)^2 - F_2^2 + F_2^2 \cos 4\phi} \quad (14)$$

相位计算误差 $\Delta\phi$ 较小, 并将分母用级数展开, (14)式可以近似为

$$\Delta\phi = \frac{F_2^2}{4(1+F_1)^2 - F_2^2} \sin 4\phi - \frac{1}{2} \left(\frac{F_2^2}{4(1+F_1)^2 - F_2^2} \right)^2 \sin 8\phi + \dots \quad (15)$$

由(15)式可知, 在多光束干涉情况下采用四幅算法进行相位计算时, 相位计算误差为待测相位 ϕ 的 4 倍周期的正弦函数, 叠加上 8 倍周期的正弦函数, 以及更高阶周期的正弦函数。

3.2 基于 $\pi/4$ 的相移平均方法

(15)式中第二项的系数较小, 所以多光束干涉的相位计算误差主要为 $\sin 4\phi$ 的形式。为了抑制多光束干涉造成的相位计算误差, 采集相移间隔 $\pi/4$ 的干涉图, 即相移量分别为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4$

$4, 3\pi/2, 7\pi/4$ 的 8 幅干涉图, 将它们分成两组, 其中第 1、3、5、7 幅干涉图为第一组序列, 4 幅干涉图之间相移量间隔 $\pi/2$, 用四幅算法计算得到的相位计算误差为 $\sin 4\phi$ 的形式, 第 2、4、6、8 幅干涉图为第二组序列, 4 幅干涉图之间相移间隔 $\pi/2$, 用四幅算法计算得到的相位计算误差为 $\sin[4(\phi + \pi/4)]$ 的形式。如将两次计算得到的相位做平均, 可以抵消由多光束干涉造成的相位计算误差。图 4 为在参考面反射系数 $r_1 = 0.2$, 被测面反射系数 $r_2 = 0.6$ 的情况下的相位计算误差情况, 其中图 4(a) 为四幅算法计算得到的相位误差曲线, (b) 为本文所述基于四幅算法的 $\pi/4$ 相移平均方法计算得到的相位误差曲线, 横坐标为初始相位分布, 纵坐标为相位计算误差。图 4(a) 中相位计算误差曲线为 $\sin 4\phi$ 的形式, 图 4(b) 中相位计算误差曲线中 $\sin 4\phi$ 的成分已经被消除, 剩余的为(15)式中第二项 $\sin 8\phi$ 的成分, 可以看出相位计算误差的大小已远小于平均之前的结果。

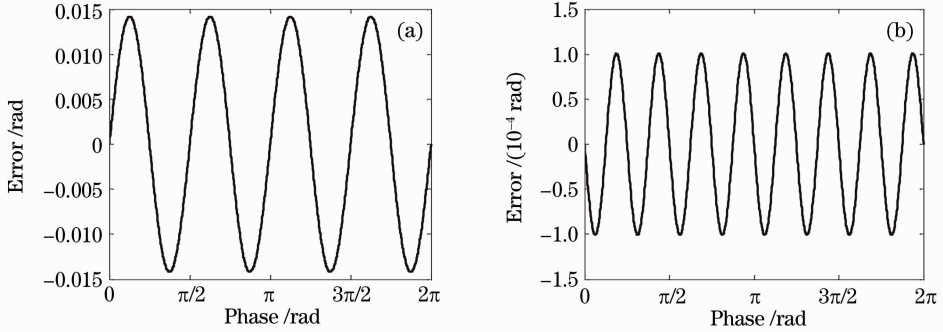


图 4 相位计算误差。(a)四幅算法;(b) $\pi/4$ 相移平均方法

Fig. 4 Phase error of four-frame phase-shifting algorithms. (a) 4-frame algorithm;

(b) $\pi/4$ phase-shifting averaging method

常规的相移间隔为 $\pi/2$ 的相移算法都是基于传统四幅算法的发展^[8], 所以其他的相移算法在多光束干涉情况下的相位计算误差皆可用(15)式表示, 因此通过采集相移间隔为 $\pi/4$ 的两组干涉图序列, 采用基于现有相移算法的 $\pi/4$ 相移平均方法即可抑制多光束干涉造成的相位计算误差。

3.3 存在相移误差时的相位计算误差

干涉测量时存在相移误差, 相移量相对理想值 $\pi/2$ 有一定的偏离。重叠四步平均法^[9]是一种可以有效抑制相移误差的算法, 该算法以传统四幅算法为基础, 对干涉光强作采样间隔 $\pi/2$ 的 $2M+3$ 次采样, 通常取 $M=4$, 采集 11 幅相移干涉图, 其表达式为

$$\phi = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^{2M} \arctan \left(\frac{I_{k+3} - I_{k+1}}{I_k - I_{k+2}} \right). \quad (16)$$

为了在校正相移误差影响的同时抑制多光束干涉造成的相位计算误差, 采集相移间隔为 $\pi/4$ 的 22 幅干涉图并分成两组, 对每一组用重叠四步平均法计算相位, 再将两组相位值平均。第 i 幅干涉图的相移量为 $\beta_i = \pi(i-1)/4 + \delta_i$, δ_i 为相移的随机误差。假定相移随机误差 δ_i 的均方根 (RMS) 值为 $0.04 \times \pi/4$, 在多光束干涉情况下分别计算采用四幅算法、重叠四步平均法以及基于重叠四步平均法的 $\pi/4$ 相移平均方法的相位计算误差。参考面的反射系数 $r_1 = 0.2$, 测试面的反射系数 r_2 从 0.2 变化到 0.9, 图 5(a) 和 (b) 分别给出相位计算误差的峰-谷 (PV) 值和 RMS 值。从图中可以看出, 重叠四步

平均法相比较四幅算法抑制了相移随机误差,但多光束干涉造成的相位计算误差仍占主要部分,而基于重叠四步平均法的 $\pi/4$ 相移平均方法又可以抑制

多光束干涉造成的相位计算误差,特别是在测试面的反射系数 r_2 较大时,该方法的效果尤其明显。

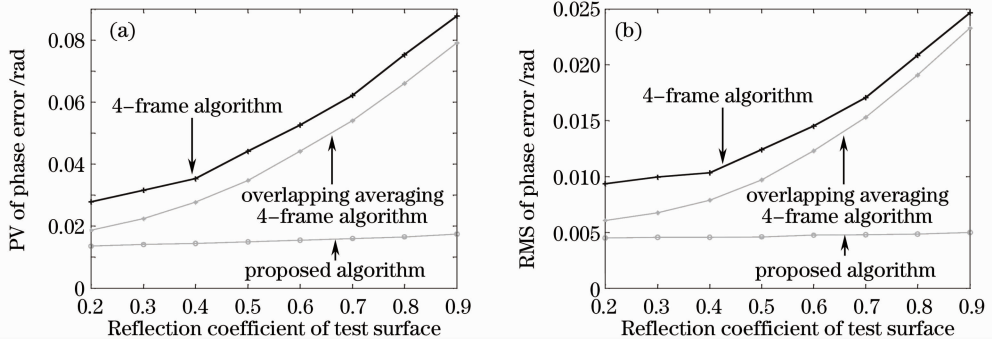


图 5 测试面反射系数变化时三种算法的相位计算误差。(a) PV 值;(b) RMS 值

Fig. 5 Phase error of three phase-shifting algorithms at different reflection coefficients of test surface. (a) PV; (b) RMS

4 实 验

为了验证基于 $\pi/4$ 相移平均方法的有效性,使用自行研制的菲佐干涉仪检测一块反射系数约为 0.7 的反射镜。首先对干涉仪的相移量进行标定,找到每步相移间隔 $\pi/4$ 对应的 22 个电压值,实际采集 22 幅干涉图的相移量与理论值有微小的偏差。测量时分为两种情况,第一种为用干涉仪直接检测反射镜面形,第二种为加能量衰减片衰减一部分光强后检测反射镜面形。根据两次采集的 22 幅干涉图,分别采用传统四幅法、重叠四步平均法和基于 $\pi/4$ 相移平均方法计算面形值。图 6 给出了多光束干涉图以及各算法计算的结果。图 6(a)~(d) 为干

涉仪直接检测反射镜面形的结果,图 6(e)~(h) 图为加能量衰减片检测反射镜面形的结果,其中(a)和(e)为多光束干涉条纹图,(b)和(f)为采用传统四幅法计算得到的面形结果,(c)和(g)为采用重叠四步平均法计算得到的面形结果,计算结果中包含明显的波纹调制,其频率为干涉条纹的 4 倍,与(15)式结果相吻合;(d)和(h)为采用基于重叠四步平均法的 $\pi/4$ 相移平均方法计算得到的面形结果,图(h)中已经完全消除了由多光束干涉引入的 4 倍条纹周期的波纹误差,而即使在多光束干涉现象较严重时,图(d)中 4 倍条纹周期的波纹误差也已基本被消除。因此,基于重叠四步平均法的 $\pi/4$ 相移平均方法适

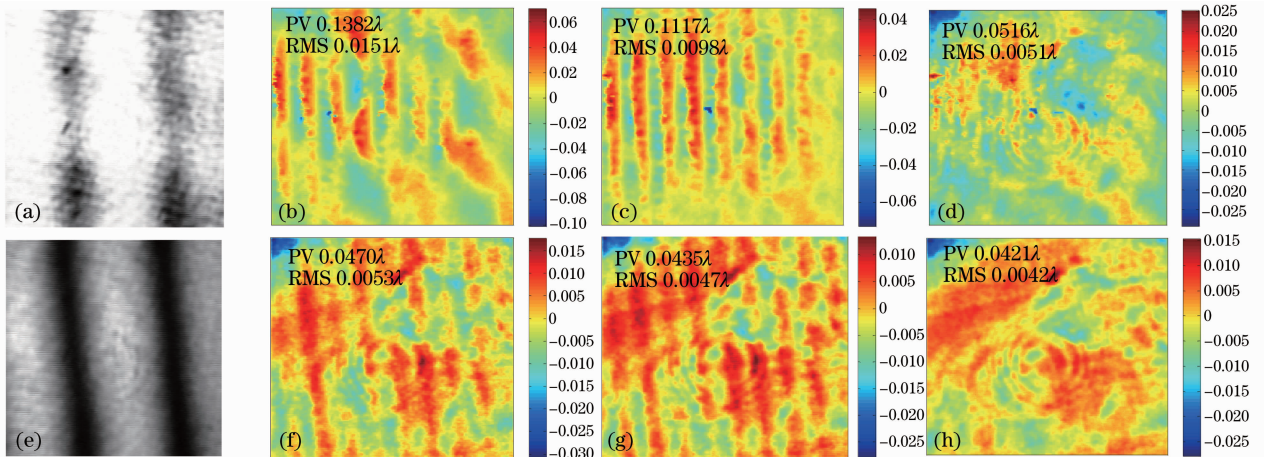


图 6 实验结果。(a)多光束干涉条纹;(b)四幅法计算结果;(c)重叠四步平均法计算结果;(d)本文算法计算结果;

(e)多光束干涉条纹(加衰减片);(f)四幅法计算结果;(g)重叠四步平均法计算结果;(h)本文算法计算结果

Fig. 6 Experimental results. (a) Multi-beam interference fringes; (b) phase obtained by 4-frame algorithm; (c) phase obtained by overlapping averaging 4-frame algorithm; (d) phase obtained by the proposed algorithm; (e) multi-beam interference fringes (with attenuator); (f) phase obtained by 4-frame algorithm; (g) phase obtained by overlapping averaging 4-frame algorithm; (h) phase obtained by the proposed algorithm

于在非佐干涉仪实际测量时抑制多光束干涉的影响。

5 结 论

针对菲佐干涉仪中存在的多光束干涉现象,首先从理论上推导了菲佐干涉仪中干涉光强的公式,并分析了将其近似为理想多光束干涉的条件,在此基础上推导出双光束相移算法造成的相位计算误差,并根据相位计算误差为4倍待测相位周期的正弦函数形式,提出采用基于 $\pi/4$ 相移平均的方法来抑制由多光束干涉引入的误差。使用菲佐干涉仪检测反射系数较高的反射镜,采集相移间隔 $\pi/4$ 的22幅相移干涉图,分别采用传统四幅法、重叠四步平均法、基于重叠四步平均法的 $\pi/4$ 相移平均方法计算面形值。采用常规相移算法计算得到的波面数据中存在明显的4倍条纹周期的波纹误差,而采用基于重叠四步平均法的 $\pi/4$ 相移平均方法即使在多光束干涉现象较严重时也可有效地抑制其造成的影响。

参 考 文 献

- 1 P. Hariharan, B. F. Oreb, T. Eiju. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(13): 2504~2506
- 2 P. Hariharan. Phase-shifting interferometry: minimization of systematic errors[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(4): 967~969

- 3 Luo Zhiyong, Yang Lifeng, Chen Yunchang. Error evaluation of cosine dependent algorithms in precision interference measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25** (12): 1629~1633
罗志勇, 杨丽峰, 陈允昌. 精密干涉测量中余弦依赖算法的误差研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1629~1633
- 4 Luo Zhiyong, Chen Zhaohui, Gu Yingzi *et al.*. Five-bucket phase-shifting algorithm based on numerical simulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1687~1690
罗志勇, 陈朝辉, 顾英姿等. 基于数值模拟的高准确度五步相移算法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1687~1690
- 5 Li Zhongliang, Wang Xiangzhao, Liu Yingming *et al.*. A method to reduce influence of multi-beam interference in sinusoidal phase modulation Fizeau interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2115~2120
李中梁, 王向朝, 刘英明等. 减小正弦相位调制菲佐干涉仪多光束干涉影响的方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2115~2120
- 6 Xu Jiancheng, Chen Jianping, Xu Qiao *et al.*. Multiple-beam phase shifting algorithms based on least-squares iteration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 224~228
徐建程, 陈建平, 许乔等. 基于最小二乘迭代的多光束相移算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 224~228
- 7 G. Bonsch, H. Bohme. Phase-determination of Fizeau interferences by phase-shifting interferometry[J]. *Optik*, 1989, **82**(4): 161~164
- 8 D. W. Phillion. General methods for generating phase-shifting interferometry algorithms [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36** (31): 8098~8115
- 9 Zhu Rihong, Chen Jinbang, Wang Qing *et al.*. A new algorithm on phase-shifting interferometry: the overlapping averaging 4-frame algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14** (12): 1288~1293
朱日宏, 陈进榜, 王青等. 相移干涉术的一种新算法:重叠四步平均法[J]. *光学学报*, 1994, **14**(12): 1288~1293

栏目编辑:何卓铭