

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0401-04

采用一种新的外推延拓法重构激光波前

王雨雷, 吕志伟, 何伟明, 朱成禹, 王 岩

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 针对传统傅里叶变换法处理光载波干涉条纹图时会有边缘效应产生的问题, 提出了一种以傅里叶位移定理为依据的外推延拓方法, 数值仿真的结果表明这一方法可以很好地抑制边缘效应所造成的较大误差, 使相位的计算精度达到 3.3 mrad。为了检验这一方法的正确性, 设计了环路径向剪切干涉系统, 测量了透过平凸透镜的激光波面, 并与传统的离散傅里叶变换的方法进行了比较。结果表明使用这一方法可以使测量精度提高一个数量级。

关键词 激光技术; 外推延拓; 傅里叶变换; 载波干涉条纹; 波前重构

中图分类号 O436 **文献标识码** A

Wavefront Reconstruction by Means of a New Extrapolation Method of Fringe-Prolongation

WANG Yu-lei, LÜ Zhi-wei, HE Wei-ming, ZHU Cheng-yu, WANG Yan

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract There are noticeable errors at the border of the pattern when the traditional Fourier transform method (FTM) is used to evaluate the carrier fringe pattern. A new extrapolation of fringe prolongation method based on the shift theorem of Fourier transform is proposed. Numerical simulations are performed to evaluate the performance of the method which reduces the errors at the borders of the pattern. An accuracy of the phase evaluation of approximately 3.3 mrad is obtained. In order to verify the method, a radial shearing interferometer system has been set up. The surface of a plano-convex lens has been measured. Wavefront traversing the sample is reconstructed by means of the new extrapolation method of fringe prolongation. The results show that errors are reduced in the processing of shearing wavefront testing.

Key words laser technique; extrapolation of fringe-prolongation; Fourier transform method; carrier fringe pattern; wavefront reconstruction

1 引 言

径向剪切干涉技术由于不需要参考波前而可以在大口径高功率激光装置中方便使用^[1,2]。Takeda 等^[3]最早提出利用傅里叶变换法 (FTM) 对光载波干涉条纹图进行处理, 它的主要优点是精确度高, 且受伪条纹和噪声的影响较小。但在实际处理数据的过程中, 离散傅里叶变换需要把有限视场内的条纹信息进行周期延拓, 延拓时由于在边界处条纹的幅值突然降为零, 导致边界信息的不连续, 使得结果在边界附近产生较大的误差, 形成所谓的边缘效应^[4]。如果对预处理的条纹数据信息的两边进行人为的数据延拓, 外推产生新的数据处理信息, 然后对其进行傅里叶变换, 则只会在外推后的数据信息边界处产生边缘效应, 而在原来的有用信息处则抑制了边缘效

应造成的较大误差, 这就是外推延拓法的主要思想。问题的难点是如何能够保证数据信息延拓的连续性, 有人提出过采用迭代的方法填充延拓数据^[5], 但是由于填充的数据与预处理的有用数据信息之间基本上没有什么关系, 很难做到延拓处的数据是连续的, 虽然也可以在一定程度上使边缘效应有所减弱, 但效果不是很理想。本文提出了一种新的外推延拓方法, 它以傅里叶位移定理为依据, 充分利用预处理的有用数据信息得到填充数据, 使得延拓处附近的数据有着较为理想的连续性, 可以很好地抑制边缘效应。

2 数学原理

经过线性载波调制的干涉场分布可以表示为

作者简介: 王雨雷(1978—), 男, 哈尔滨工业大学电子研究所博士研究生, 主要从事受激布里渊散射和高功率固体激光器的研究。E-mail: hitwyl@163.com

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)], \quad (1)$$

其中 $a(x, y), b(x, y)$ 分别表示背景光强和条纹调制强度函数, $\phi(x, y)$ 为所要提取的相位信息。将干涉强度分布改写为

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-2\pi i f_0 x), \quad (2)$$

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\phi(x, y)], \quad (3)$$

其中 * 代表复共轭。对 $g(x, y)$ 的变量 x 进行傅里叶变换, 得

$$G(f, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f + f_0, y), \quad (4)$$

对(4)式进行移频操作得到下式

$$G'(f, y) = A(f, y) + C(f + f_0, y) + C^*(f - f_0, y), \quad (5)$$

即(5)式是将(4)式中的两个旁瓣谱项 $C(f - f_0, y)$ 和 $C^*(f + f_0, y)$ 的位置进行了互换, 对(5)式进行逆傅里叶变换, 由傅里叶位移定理可知, 结果如下

$$g'(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(-2\pi i f_0 x) + c^*(x, y) \exp(2\pi i f_0 x), \quad (6)$$

将(3)式代入(6)式得

$$g'(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x - \phi(x, y)]. \quad (7)$$

假设预处理条纹信息的数据的函数表达式即为(1)式, 实际处理的数据是有限的, 这里设 $0 \leq x, y \leq l$ 。

将(1)式沿 x 方向右移 l , 并且逆序排列, 得下式

$$g_c(x', y) = a(2l - x', y) + b(2l - x', y) \cos[2\pi f_0 (2l - x') + \phi(2l - x', y)], \quad l \leq x' \leq 2l \quad (8)$$

选取合适的 l , 使得 $f_0 \cdot l$ 为整数, 事实上在截取干涉条纹图时, 只要所选的区域周期干涉条纹的个数为整数即可。则(8)式可以变为

$$g_c(x', y) = a(2l - x', y) + b(2l - x', y) \cos[2\pi f_0 x' - \phi(2l - x', y)], \quad l \leq x' \leq 2l \quad (9)$$

对(9)的频谱进行移频操作, 可得

$$g'_c(x', y) = a(2l - x', y) + b(2l - x', y) \cos[2\pi f_0 x' + \phi(2l - x', y)], \quad l \leq x' \leq 2l \quad (10)$$

$g'_c(x', y)$ 即可作为外推延拓所需的填充数据。延拓后的数据长度为 $2l$ 。它们在延拓起始位置 l 处是连续的, 所以 $g_w(x, y)$ 在整个区间 $0 \leq x \leq 2l$ 是连续的, 且用离散傅里叶变换处理时, 对 $g_w(x, y)$ 进行周期延拓, 由函数的表达式可知其在边界处也是连续的, 因此不会产生边缘效应。

3 空间载波条纹图相位提取的数值模拟

图 1(a) 是模拟的含有相位信息的载波条纹干涉图, 图 1(b) 是纯载波条纹图, 预提取的相位信息 ϕ 的函数曲面如图 2 所示。采用传统的傅里叶变换法对

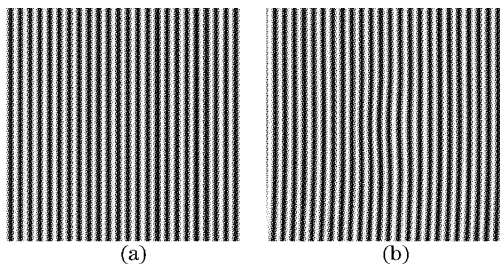


图 1 模拟(a)和纯(b)载波干涉条纹

Fig. 1 Simulated (a) and pure carrier (b) fringe pattern

相位信息进行了提取, 结果如图 3(a) 所示, 在图 3(b) 中给出了误差图像。图 4 分别为采用频域移频外推延拓法得到的仿真结果和相应的误差图像。

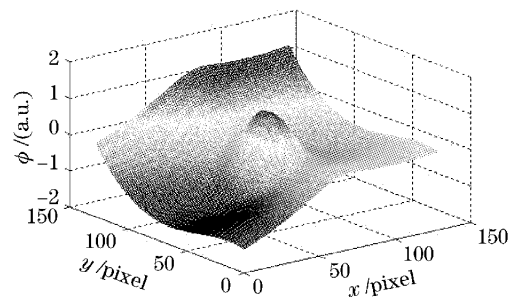


图 2 预提取的相位信息

Fig. 2 Assumed phase

从图中可以看出, 传统傅里叶变换法的边缘效应非常明显, 而外推延拓法的结果确实较为理想。从图 4(b) 的误差图中可以发现外推延拓法在边界处的误差相对内部而言也较大, 但这并非边缘效应造成的。事实上在做外推延拓时, 虽然可以保证在延拓位置处数据是连续的, 但是不能保证该处的函

数曲线是平滑的,恰恰是由于延拓处的不平滑性,导致了那里的误差相对较大,这与边缘效应造成的大

误差有本质区别。

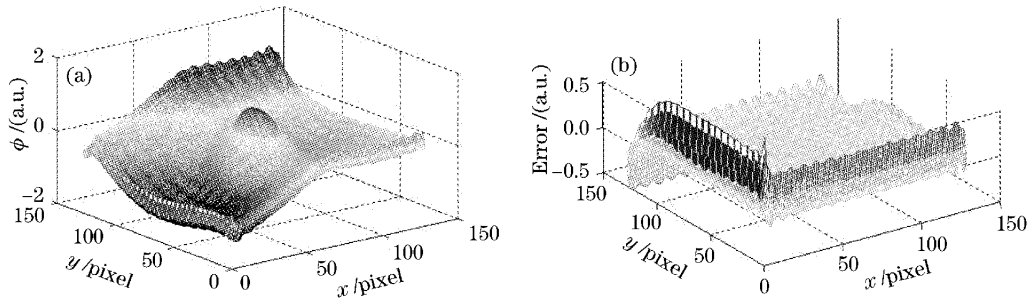


图3 采用传统傅里叶变换法的结果(a)和误差(b)
Fig.3 Retrieved phase by FTM (a) and its error (b)

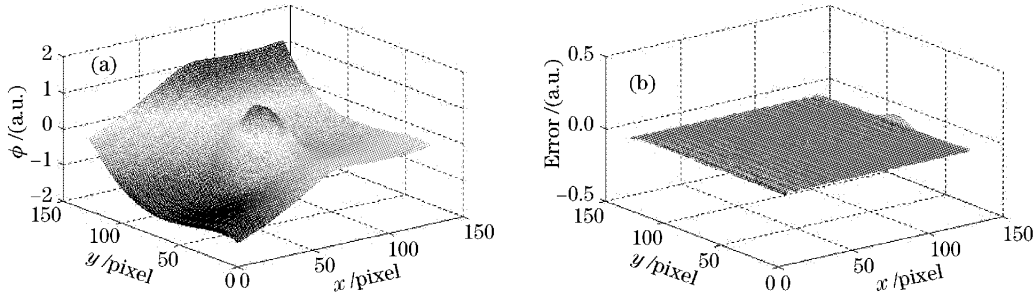


图4 采用外推延拓法的结果(a)和误差(b)
Fig.4 Retrieved phase by modified method (a) and its error (b)

4 实验研究

4.1 实验光路

为了从实验上验证方法的正确性,搭建了环形径向剪切干涉仪测量波前畸变,实验光路系统如图5所示。实验中所用的激光光源是 Nd:YAG 脉冲激光器。光束被分束片 BS 分束,分束片的透射率约为 60%,透射光经剪切比 $\beta=1/2$ 的扩束系统(L_1 与 L_2 的透镜组)扩束,反射光则缩束,后均于分束片 BS 处出射,用 CCD 相机获取干涉条纹图。

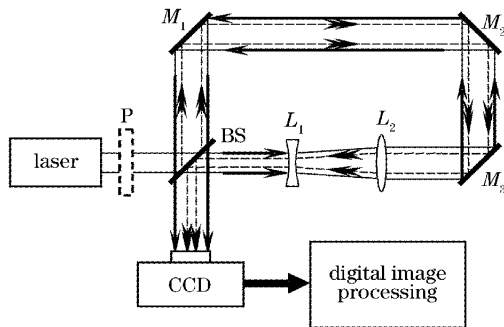


图5 环形径向剪切干涉测量系统
Fig.5 Sketch of the experiment setup for the radial shearing interferometer
光路中插入具有特定面形的样品 P,用于引入

波前畸变。略微倾斜分束片使得透反两光束波前产生一定的倾角,形成等厚干涉从而引入线性载波。撤掉样品 P 后,再次测量即可获得纯载波的干涉条纹图。将两次获得的干涉条纹图分别进行波前重建后,相减即可得到样品 P 所引入的波前畸变,从而检测出样品 P 的面形。

4.2 实验结果

为了验证本文提出的外推延拓在激光波前检测中的实际效果,选取一长焦平凸透镜作为样品,进行了波前检测实验。图6分别是插入样品和撤掉样品得到的干涉条纹图。

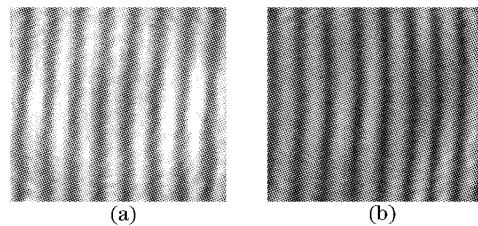


图6 截取后平凸透镜(a)和纯载波(b)干涉图
Fig.6 Interferogram of plano-convex lens (a) and pure carrier (b)

图7是经过外推延拓后的空间载波干涉条纹图,从图中可以看出最初的干涉图的边界处理理想地

被外延了,成为一个完整的扩大的载波条纹图。

图 8 分别是采用传统傅里叶变换法和外推延拓法提取得到的扩束和缩束光波在重叠区域内的相位差分布。从图 8(b)中可以看出采用传统傅里叶变换

法提取的相位差分布在边界处边缘效应非常明显,而外推延拓法提取的相位差分布在边界处没有明显的边缘效应。再经波前重建,迭代出原始的波前形状如图 9 所示。可以看出,波前的整体形状是一个球面。

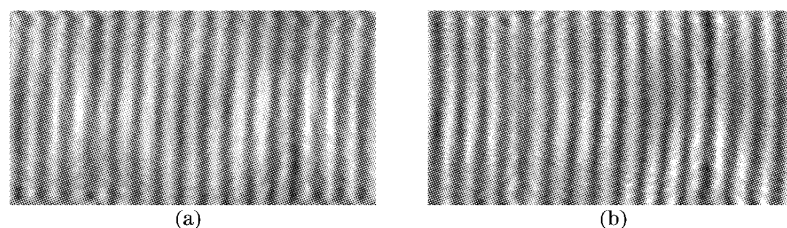


图 7 外延后平凸透镜(a)和纯载波(b)干涉图

Fig. 7 Interferogram of plano-convex (a) and pure carrier (b) by extrapolating

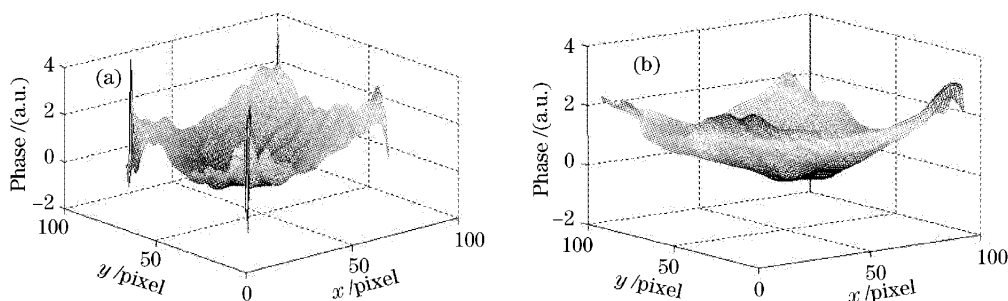


图 8 傅里叶变换法(a)和外推延拓法(b)提取的平凸透镜相位差

Fig. 8 Phase difference of plano-convex after intercepted by FTM (a) and modified method (b)

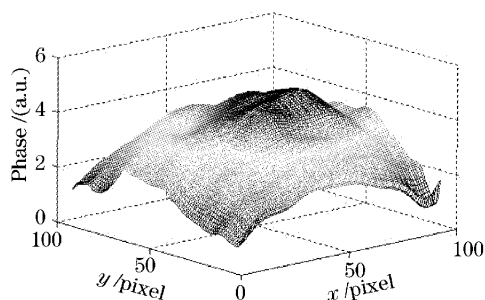


图 9 重建的平凸透镜面形

Fig. 9 Reconstructed plano-convex surface

5 结 论

利用环路径向剪切干涉系统测量了经过平凸透镜后的激光波前。采用本文提出的外推延拓的方法对空间载波干涉条纹图进行了相位提取,重建的波前与被测面形基本一致,证明了搭建的环路径向剪切干涉系统与采用的提取空间载波条纹图相位的方法及波前重建算法的正确性。

实验中,各种光学元件对光束引入的附加波前畸变,尤其是环路系统中重要的光学器件望远镜系

统,总存在一定的像差,以及分束片两个端面反射造成的干涉,均可通过波前重建算法中的 SPUCF 法^[6],把含有畸变信息的干涉图样与纯载波干涉图样分别重建再相减后消除。

参 考 文 献

- 1 P. J. Wegner, M. A. Hennesian, J. T. Salmon *et al.*. Wavefront and divergence of the beamlet prototype laser [C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 1019~1030
- 2 A. R. Barnes, I. C. Smith. A combined phase, near field and far field diagnostic for large aperture laser systems [C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 564~572
- 3 Mitsuo Takeda, Hideki Ina, Suji Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- 4 J. B. Liu, P. D. Ronney. Modified Fourier transform method for interferogram fringe pattern analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(25): 6231~6241
- 5 Juergen H. Massig, Joachim Heppner. Fringe-pattern analysis with high accuracy by use of the Fourier-transform method; theory and experimental tests [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(13): 2081~2088
- 6 Antonio Fernández, Guillermo H. Kaufmann, Angel F. Doral *et al.*. Comparison of carrier removal methods in the analysis of TV holography fringes by the Fourier transform method [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(11): 2899~2905