

基于傅里叶变换迭代的条纹延拓方法研究

朱荣刚, 周健杰, 张敏涛, 陈 鹏

(金陵科技学院网络与通信工程学院, 江苏 南京 211169)

摘 要: 傅里叶变换相位提取算法仅需一幅条纹图便可求解待测件的相位信息, 相较于移相法相位提取算法具有实时测量的优点, 但是傅里叶变换方法的测量精度较低。为了提升测量精度, 研究了一种基于傅里叶变换迭代的条纹延拓方法。仿真实验表明, 该方法能够有效抑制边缘效应, 测量结果偏差的峰谷(PV)值从 2.154 rad 下降至 0.083 rad, 均方根(RMS)值从 0.066 rad 下降至 0.003 rad。实物实验取得了理想的效果, 进一步验证了该算法的可行性。

关键词: 傅里叶变换; 迭代; 相位提取; 条纹延拓; 边缘效应

中图分类号: O438

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2021)03-0022-06

Research on Fringe Region Spreading Method Based on Iterative Fourier Transform

ZHU Rong-gang, ZHOU Jian-jie, ZHANG Min-tao, CHEN Peng

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: The phase extraction algorithm with Fourier transform only needs a single fringe pattern to solve the phase information of the component to be measured. Compared with the phase-shifting method, the phase extraction algorithm has the advantage of real-time measurement. However, the measurement accuracy of this algorithm is slightly low. In order to improve the measurement accuracy, a method of fringe region spreading based on iterative Fourier transform is researched in this paper. Simulation experiments show that this method can effectively suppress the edge effect, and the peak-to-valley(PV) value is reduced from 2.154 rad to 0.083 rad, and the root-mean-square(RMS) value is reduced from 0.066 rad to 0.003 rad. Satisfactory results are obtained in real experiment, which further verifies the feasibility of the algorithm.

Key words: Fourier transform; iteration; phase extraction; fringe region spreading; edge effect

在光学干涉测量^[1-3]和条纹投影轮廓术^[4-7]等领域经常会用到傅里叶变换相位提取算法, 该算法仅需一幅图像便能获取被测件的相位信息, 具有实时测量的优点。但是傅里叶变换相位提取算法也有一定的缺陷, 由于其产生的边缘陡变会造成频谱泄露, 即产生边界效应^[8-10], 导致相位提取结果不准确。为此, 最直接有效的方法是对条纹图进行空域延拓, 对延拓后的图像进行相位提取, 再抠取有效区域相位值^[11]。

收稿日期: 2021-06-02

基金项目: 金陵科技学院高层次人才科研启动基金(jit-b-201829); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB510013)

作者简介: 朱荣刚(1984—), 男, 江苏盐城人, 讲师, 博士, 主要从事光学干涉测量及图像处理技术等方面的研究。

一些学者将图形处理中的样本块算法引入其中,取得了一定的效果^[12],但是样本块的提取涉及样本大小的选取,以及在实际操作过程中未必能够在原始图形中找到合适的样本。在处理图像边缘效应上,梁英等采用离焦模糊的方法进行边缘延拓^[13],取得了一定的效果。但是对于干涉条纹图采用这种离焦模糊的方法将降低条纹的对比度,不利于相位求解,降低相位解包的成功率。郭书君等采用 Shannon-cosine 小波实现农田遥感图像纹理延拓^[14],该方法应用多尺度插值小波解偏微分方程,根据图像的灰度变化自适应选取配置点,然后根据配置点利用包围盒识别农田遥感图像的纹理方向,进一步沿纹理方向进行延拓。该方法比较适合于干涉条纹图延拓,但是方法本身较复杂,应用小波变换等操作时计算速度慢。为此,本文采用一种基于傅里叶变换迭代的条纹延拓方法,快速准确地实现条纹延拓,以提高干涉测量的精度。

1 基础理论

本文在相位提取和条纹延拓过程中均用到了傅里叶变换技术。其中,在相位复原过程中是通过提取条纹图频谱中的信号谱来复原相位的,而在傅里叶变换迭代条纹延拓过程中需要反复迭代提取信号谱和背景谱。因此,两者在算法上相通,但方法不同。

1.1 傅里叶变换相位提取算法

通常情况下,一个单幅条纹图可表示为:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi(f_x x + f_y y) + \phi(x, y)] \quad (1)$$

其中, $a(x, y)$ 是背景光强分布; $b(x, y)$ 是条纹对比度分布; $\phi(x, y)$ 是被测相位; f_x, f_y 分别是条纹在 x, y 方向上的空间频率。

对公式(1)进行傅里叶变换,变换后的频谱表达式可以表示为:

$$FT[I(x, y)] = A(f_x, f_y) + S_{\pm 1}(f_x, f_y) \quad (2)$$

其中, FT 为二维傅里叶变换操作; $A(f_x, f_y) = FT[a(x, y)]$ 是背景谱; $S_{\pm 1}(f_x, f_y) = FT\left\{\pm j\left[\frac{1}{2}b(x, y)\right] \cdot \exp\left[2\pi(f_x x + f_y y) + \phi(x, y)\right]\right\}$ 是 ± 1 级信号谱。

在公式(2)中,有 3 个峰值成分,分别是背景谱和 ± 1 级信号谱。通过窗口滤波函数对 $+1$ 级信号谱进行提取,将提取后信号的实部与虚部相除,并对其进行反正切操作,便可得到最终的被测相位分布,公式如下:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{Im(FT^{-1}\{FT[I(x, y)]H(f_x, f_y)\})}{Re(FT^{-1}\{FT[I(x, y)]H(f_x, f_y)\})} - 2\pi(f_x x + f_y y) \quad (3)$$

其中, FT^{-1} 为傅里叶逆变换操作; Re 和 Im 分别是取实部和取虚部的操作; $H(f_x, f_y)$ 是窗口滤波函数; $2\pi(f_x x + f_y y)$ 是倾斜量,在实际计算过程中可以通过消倾斜算法将其消除。

1.2 傅里叶变换迭代条纹延拓方法

对于含有无效条纹的条纹图,相当于在公式(1)的条纹图上乘上一个有效范围函数,即:

$$I_r(x, y) = D_s(x, y) I(x, y) \quad (4)$$

其中, $D_s(x, y)$ 是描述条纹图空间域有效范围的函数,可写成:

$$D_s(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{有效条纹区域内} \\ 0 & \text{有效条纹区域外} \end{cases} \quad (5)$$

公式(4)的傅里叶变换频谱为:

$$FT[I_r(x, y)] = FT[D_s(x, y)] * FT[I(x, y)] \quad (6)$$

在傅里叶变换过程中,只有对无限大的区域进行变换才不会引入误差,但由于有效区域函数 $D_s(x, y)$ 具有陡变特性,其傅里叶变换频谱 $FT[D_s(x, y)]$ 将出现明显的波纹现象。因此,最直接的方法就是通过条纹延拓来拓宽有效区域函数,降低这种波纹对原来有效区域相位的干扰。具体的条纹延拓流程如图 1 所示,具体步骤为:先对原始条纹图进行傅里叶变换,然后通过窗口函数对背景谱和 $+1$ 级信号谱进行提取,在提取过程中自然滤除了 ± 2 级、 ± 3 级等高次谐波,抑制有效区域函数的波纹干扰。所以在进行二维逆

变换之后,条纹的边缘会被延拓。最后,提取 D_s 为 0 区域的含背景条纹图,与原始条纹图的条纹区域进行叠加,得到新的延拓条纹图。重复上述操作,直至延拓条纹图本身没有明显变化,延拓完成。

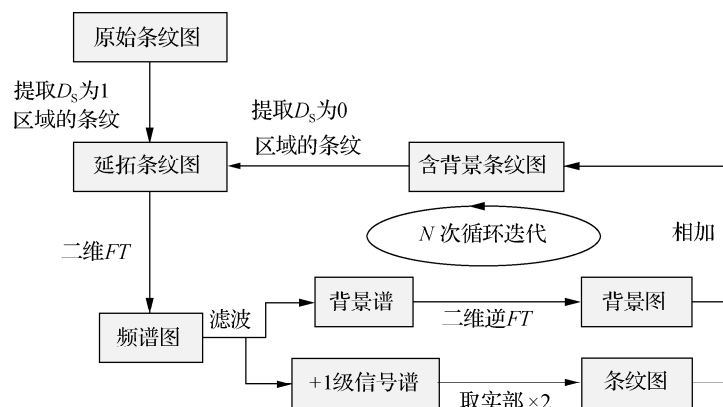


图 1 傅里叶变换迭代条纹图延拓流程

2 实验结果与分析

实验分仿真实验和实物实验两部分进行,仿真实验定量观察条纹延拓前后的结果,实物实验验证算法的实际应用情况。

2.1 仿真实验

仿真实验的相位分布及其对应的条纹图如图 2 所示。其中,图 2(a)是由 peaks 函数仿真的相位分布,图 2(b)是该相位图在 x 方向添加了一定的线性载频量后生成的条纹图。考虑到绝大多数光学元件都为圆形,在干涉测量中的干涉图也为圆形,所以本文仿真实验设定的条纹图有效区域为圆形。

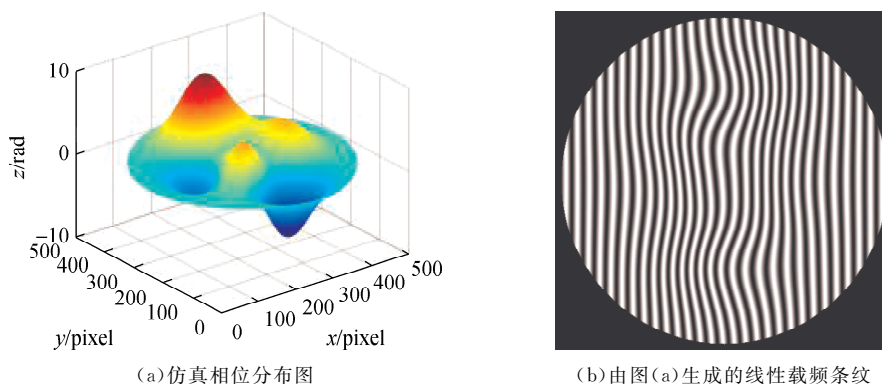


图 2 仿真相位图及其生成的条纹

图 2(b)经傅里叶变换后的频谱如图 3 所示,图 3 包含了明显的 0 级背景谱和 ± 1 级信号谱。0 级背景谱及其周围的频谱展宽代表背景分量,而 ± 1 级信号谱的频谱展宽包含着相位信息,也是后续要提取的量。

对图 3 的 +1 级信号谱进行提取,通过公式(3)求取包裹相位,结合相位解包算法^[15-16]和消倾斜操作等,最终得到的相位复原结果如图 4 所示。其中,相位复原结果偏差的 PV 值为 2.154 rad, RMS 值为 0.066 rad。观察后发现,在当前复原结果的边缘处出现了明显的波纹状误差。

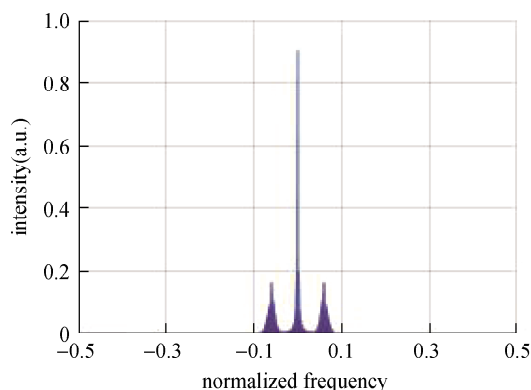


图 3 傅里叶变换频谱

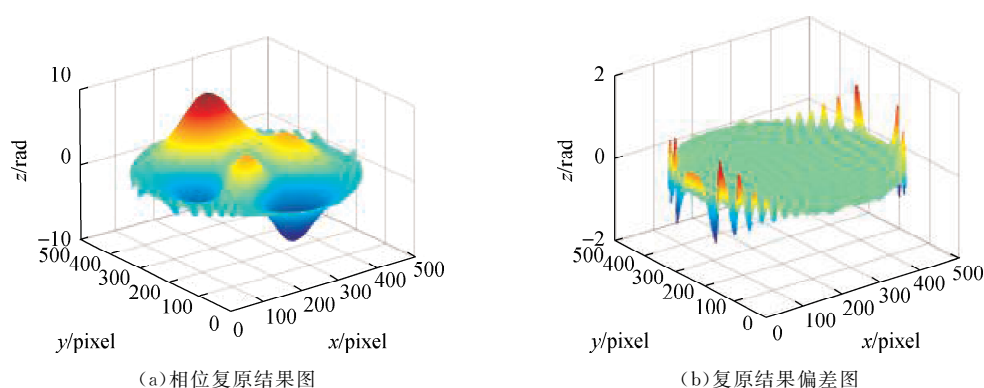


图4 相位复原结果及偏差图(仿真实验)

使图 2(b)按照图 1 所示的流程进行傅里叶变换迭代操作,最终得到延拓后的条纹图(图 5)。可见,条纹由原始有效区域延伸至整个图像区域。

对图 5 进行相位提取,再抠取原始有效区域的相位,结果如图 6 所示,此时相位复原结果的 PV 值为 0.083 rad,RMS 值为 0.003 rad。与图 4(b)相比,边缘的波纹误差被有效抑制,测量结果的精度也有了明显提升。

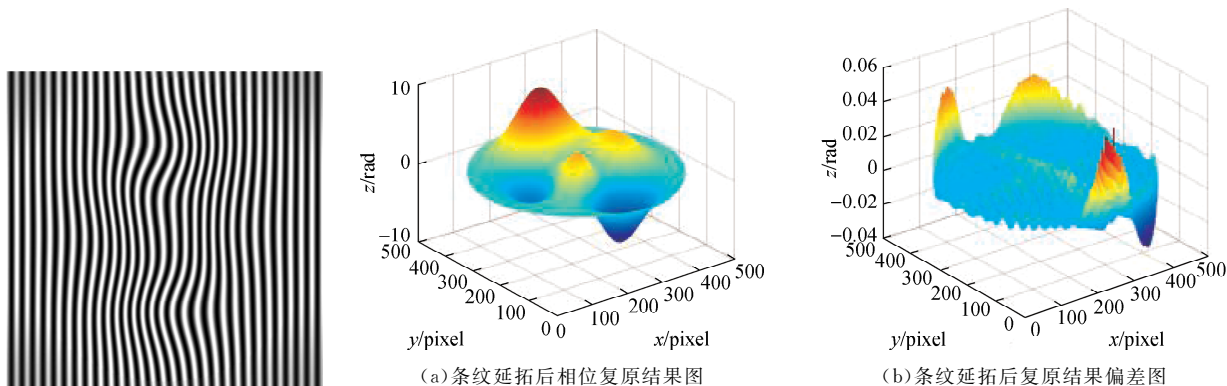


图5 延拓后的条纹(仿真实验)

图6 条纹延拓后相位复原结果及偏差图(仿真实验)

2.2 实物实验

本文实物实验数据是由激光干涉仪对光学元件面形进行检测后得到的,实验搭建的干涉仪测量装置如图 7 所示。其中,激光光源由光纤导入干涉仪主机,主机放置在五维调整架上,可以实现自由调节。实验采集的干涉图如图 8 所示,被测件为一常规的标准平面镜。观察可见,实际测量中的干涉图的背景光强表现出中间强、边缘弱的特点,满足一定的高斯分布。

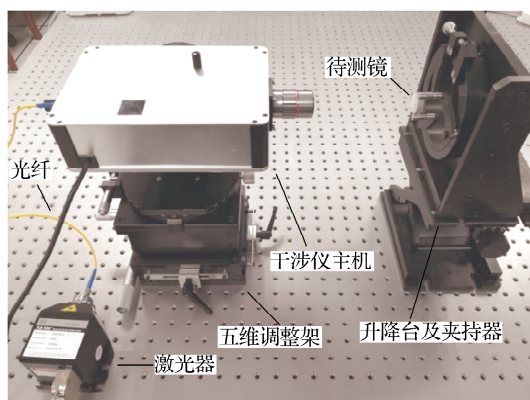


图7 干涉仪测量装置

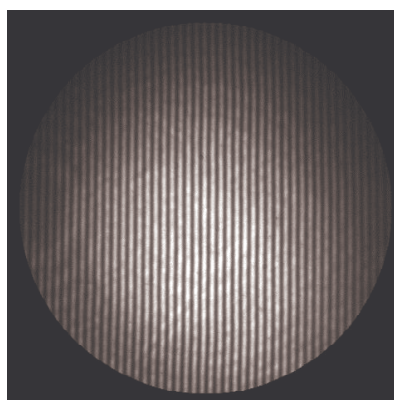


图8 相机采集的干涉条纹(实物实验)

直接对图 8 进行傅里叶变换相位提取,结果如图 9 所示。PV 值为 8.239 rad,RMS 值为 0.521 rad。在测量结果的边缘处同样出现了与图 4(b)相似的波纹误差。

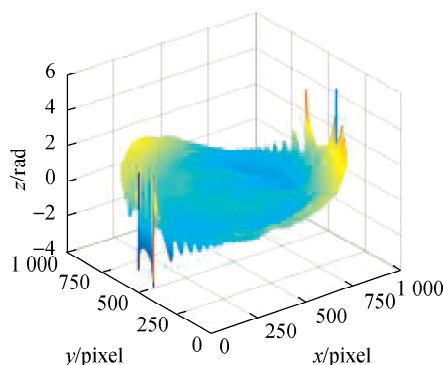
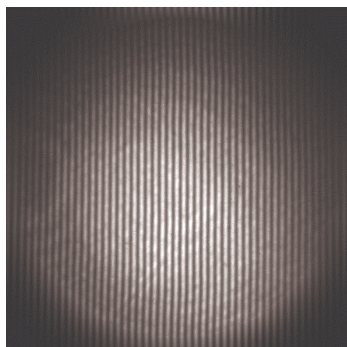
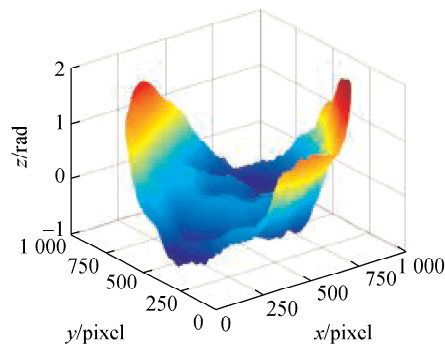


图 9 傅里叶变换法相位提取结果(实物实验)

对图 8 进行延拓后的结果如图 10 所示。相位复原结果的 PV 值为 2.644 rad,RMS 值为 0.516 rad,相较图 9 的测量结果,边缘效应基本能够被完全消除。



(a) 延拓后的干涉条纹



(b) 图(a)经傅里叶变换的相位提取结果

图 10 条纹延拓后相位提取结果(实物实验)

2.3 实验分析

从上述实验可以看出,采用的条纹图需要有一定的线性载频量。如果没有,条纹图呈现稀疏状,此时傅里叶变换迭代对+1 级信号谱进行提取时,会同时提取到背景谱和+2、+3 级等高次谐波分量,降低条纹延拓的效果。此时进行相位提取,也将面临相同的问题,造成相位复原结果的不精确。图 11 是不同归一化频率下的相位复原结果精度曲线图。由图可见,归一化线性载频在达到 0.052 时,相位复原结果偏差的 PV 值趋于稳定,约为 0.083 rad;在达到 0.06 时,RMS 值也趋于稳定,约为 0.003 rad。

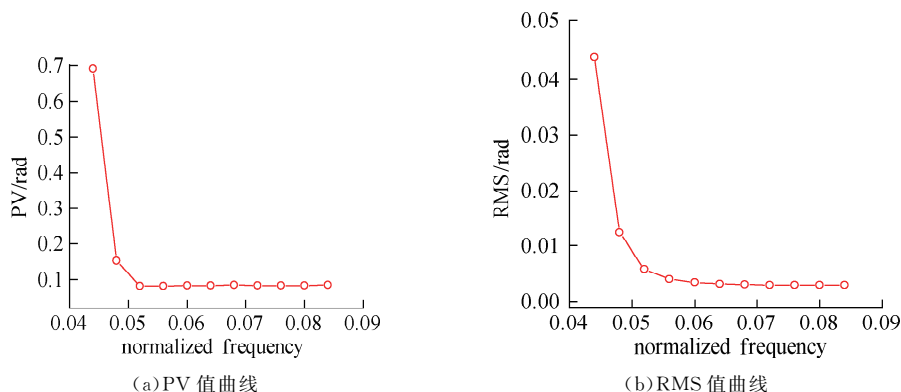


图 11 不同线性载频下相位复原结果精度曲线

3 结 语

本文介绍了一种提升傅里叶变换相位提取算法精度的方法,该方法通过傅里叶变换迭代技术对原始条纹图进行延拓,再对延拓后的条纹图进行相位提取,最后抠取有效区域的相位结果。仿真实验和实物实验均表明,通过本文方法能够有效抑制边缘效应对测量结果的干扰,提升相位测量精度。因此,该方法为干涉测量、傅里叶变换轮廓术等应用于单幅图相位提取的各项技术,在提升测量结果精度方面提供了参考。

参考文献:

- [1] 王晓辉,曹根瑞,梅文辉. 激光数字波面干涉仪傅里叶变换移相干涉术[J]. 光电工程,1997,24(4):52-55
- [2] ALTAQUI A, KUDENOV M W. Phase-shifting interferometry-based Fourier transform channeled spectropolarimeter [J]. Applied Optics,2019,58(7):1830-1840
- [3] 张敏,唐锋,王向朝,等. 二维快速傅里叶变换干涉图相位提取误差分析[J]. 中国激光,2013,40(3):184-189
- [4] 苏显渝,谭松新,向立群,等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. 光学学报,1998(9):1228-1233
- [5] OPANCHUK B, ROSALES-ZÁRATE L, REID M D, et al. Robustness of quantum Fourier transform interferometry[J]. Optics Letters,2019,44(2):343-346
- [6] 管文洁,吴庆尉,公超,等. 基于傅里叶变换轮廓术的动态液膜测量[J]. 应用光学,2020,41(2):366-374
- [7] 李小燕,文永富,程灏波,等. 基于立方体分光棱镜的干涉投影傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报,2019,39(4):225-233
- [8] 马子扬,刘学慧,吴恩华. 图像反卷积边界效应的快速抑制算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2014(7):1051-1059
- [9] QIN Y, WANG T, MAO Y F. Fast convolution algorithm for discrete wavelet transformation[J]. Journal of Vibration & Shock,2013,32(23):186-190
- [10] 张婕,陈明仪. 傅里叶变换中干涉条纹的外插新算法[J]. 光学仪器,1996,18(1):20-26
- [11] 王雨雷,吕志伟,何伟明,等. 采用一种新的外推延拓法重构激光波前[J]. 中国激光,2006,33(Z1):401-404
- [12] 苏俊宏,朱日宏,陈磊,等. 基于样本匹配的干涉图延拓技术研究[J]. 红外与激光工程,2007,36(1):82-85
- [13] 梁英,于洵,陶禹,等. 散焦图像边缘振铃抑制算法[J]. 电子测量技术,2019,42(4):84-89
- [14] 郭书君,梅树立,李丽. 基于 Shannon-cosine 小波的农田遥感图像纹理延拓[J]. 农业机械学报,2017,48(S1):142-146
- [15] 郭仁慧,李建欣,朱日宏. 基于 DCT 算法的种子点相位解包算法[J]. 光学学报,2012,32(2):149-156
- [16] FENG Y F, HAN Y, ZHANG Q C. Two 3D spatial phase unwrapping algorithms for dynamic 3D shape measurement [J]. Journal of Modern Optics,2020,67(19):1479-1491

(责任编辑:湛 江)