

文章编号:1004-4213(2010)11-2031-5

# 空间载频干涉法全场测量长度技术\*

王小鹏<sup>1,2</sup>, 朱日宏<sup>1</sup>, 苏俊宏<sup>3</sup>, 陈磊<sup>1</sup>

(1 南京理工大学 电光学院, 南京 210094)

(2 西安应用光学研究所, 西安 710056)

(3 西安工业大学 光电学院, 西安 710032)

**摘 要:**在研究二维快速傅里叶变换法进行干涉测试基本原理的基础上,提出一种基于二维快速傅里叶变换的长度测量法.以量块长度的测量为对象,被测量块置于泰曼-格林干涉仪测试光路中,参考光波分别与待测长度的量块表面和辅助平面反射的测试光波形成干涉条纹,条纹由图像采集系统采集.利用编制的算法处理软件,通过处理干涉条纹图中量块边缘识别、区域延拓、滤波、波面统一,获得了量块全场表面的空间长度分布,实现了对量块长度的自动化测量.结果表明:该测量法不仅具有较高的测量准确度,而且具有全场测试和非接触测量等优点.

**关键词:**干涉术;干涉条纹;长度;快速傅里叶变换

**中图分类号:**O436.1

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103911.2031

## 0 引言

量块是重要的长度实物标准,它将长度单位传递到工业生产的各个环节,在产品质量保证体系中发挥着重大作用.在计量部门和工业校准实验室,它和其测量设备组成的检定系统提供一种溯源国际米标准的重要手段.光干涉计量测试技术是以波长为计量单位,是一种公认的高准确度计量测试技术.干涉仪输出的是一幅干涉图,借助于数学物理模型,可以将干涉图与多种被测参量相联系,从而实现测量相关的物理参量.对于高准确度量块长度的测量,相位偏移法是目前所有数字波面干涉仪采用的成熟方法,但该方法需采集多幅干涉图,且要求测量环境较长时间保持不变,尤其是对移相器的准确度要求很高,其相位复原及波面统一算法复杂.20世纪80年代,C. Roddier 提出将快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)方法应用于干涉图处理<sup>[1]</sup>,不仅能提取干涉图波面分布,而且可消除噪声.本文采用傅里叶变换技术,通过对空间载频干涉图的处理<sup>[2]</sup>,由空域到频域,经滤波去除干扰信息,再由频域到空域,从中提取被测长度参量的空间相位分布.该方法的创新点在于,通过对一幅静态干涉图的处理,可获得量块的长度分布.测量结果表明,该方法不仅具有较高的测量准确度,而且具有全场和非接触测量等优点,从而大大地降低了对测试设

备及测试条件的要求.

## 1 原理

量块长度的测量是在泰曼-格林型平面干涉仪上进行的.倾斜干涉仪的参考反射镜,干涉图中的条纹数增加,这相当于在  $x$  方向和  $y$  方向各引入了空间载频  $f_x$ 、 $f_y$ ,由此可获得加有一定载频的静态干涉图,其光强表达式如式(1).

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

式中,  $a$  和  $b$  是位置坐标  $(x, y)$  的函数,  $a$  是干涉图背景,  $b/a$  是干涉图对比度,  $\phi(x, y)$  为待测相位.

为了求出  $\phi(x, y)$ ,将式(1)改写成复数表达式

$$i(x, y) = a + c(x, y) \exp(j2\pi f_x x + j2\pi f_y y) + c^*(x, y) \exp(-j2\pi f_x x - j2\pi f_y y) \quad (2)$$

式中

$$c(x, y) = b \exp[j\phi(x, y)]/2 \quad (3)$$

式中: \* 表示复共轭.

在干涉图区域内,对式(2)中的空间变量作二维 FFT 变换,有

$$I(f_1, f_2) = A(f_1, f_2) + C(f_1 - f_x, f_2 - f_y) + C^*(f_1 + f_x, f_2 + f_y) \quad (4)$$

式中:  $A(f_1, f_2)$  是干涉图背景光强的频谱即零级谱分布函数,  $C(f_1 - f_x, f_2 - f_y)$  是正一级频谱的分布函数,  $C^*(f_1 + f_x, f_2 + f_y)$  是负一级频谱的分布函数.若载频  $f_x$  或  $f_y$  取得适当大,就可使零级频谱与正负一级频谱分离开来.采用一个中心频率为  $(f_x, f_y)$ , 频带宽度适当的滤波器,就可将正一级(或负一

\* 科技部国际合作项目(2010DFR70530)资助

Tel: 029-88288020 Email: wangxiaopeng205@sina.com

收稿日期: 2010-04-01

修回日期: 2010-07-05

级)频谱即  $C(f_1 - f_x, f_2 - f_y)$  分离出来. 然后在频域上将  $C(f_1 - f_x, f_2 - f_y)$  从  $(f_x, f_y)$  平移到原点而得到  $C(f_1, f_2)$ , 这样就消除了不需要的背景  $a$ , 再对其进行二维傅里叶逆变换

$$F^{-1}[C(f_1, f_2)] = c(x, y) = b \exp [j\phi(x, y)] / 2 \quad (5)$$

得到式(3)中的  $c(x, y)$ , 从该表达式就可求出带有量块长度信息的相位分布函数  $\phi(x, y)$  为

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\text{Im} [c(x, y)]}{\text{Re} [c(x, y)]} \quad (6)$$

式中:  $\text{Re} [c(x, y)]$ ,  $\text{Im} [c(x, y)]$  分别是  $c(x, y)$  的实部和虚部<sup>[3]</sup>.

求出相位分布  $\phi(x, y)$  后, 则干涉仪全场内任意一点处的长度  $h(x, y)$  为

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x, y) \quad (7)$$

## 2 测试装置及实验

测试装置由泰曼-格林平面干涉仪与图像采集系统组成, 如图 1. 干涉仪采用稳频的 He-Ne 激光器作为光源, 激光器发出的激光经消除散斑后投射到干涉仪的入射光阑处, 由准直系统扩束成平行光, 经分光镜分成两束, 分别均匀照射在被测量块与标准辅助平面组成的测试件和标准参考反射镜上, 被测量块上表面和辅助平面上表面的反射光分别与标准参考反射镜的反射光在分光镜处相遇后产生两组等厚干涉条纹. 这些干涉条纹图像由成像透镜成像, 经干涉仪出射光阑投射于图像采集系统而被采集. 采集过程通过计算机控制, 由低照度的 CCD 摄像机摄取干涉条纹图像并存贮到计算机中. 当需要对干涉图像进行实时或延后处理时, 由图像采集系统和干涉条纹算法处理软件合成的干涉图像自动分析系统来完成.

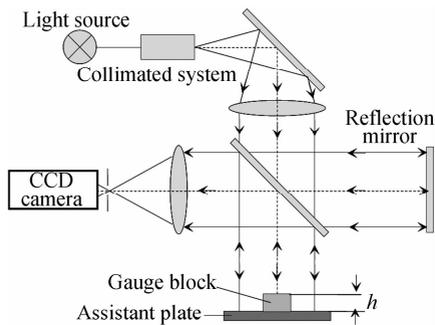


图 1 量块长度干涉测试系统  
Fig. 1 Interference measuring system of gauge block length

## 3 干涉条纹图处理

### 3.1 量块边缘识别

由式(6)求得的相位主值范围为  $-\pi \sim +\pi$ , 其相位分布存在两种跃变: 一种是由于量块边缘的存

在, 使得量块的底面与辅助平面之间台阶式的分布而引起的相位跳跃; 另一种是由反正切计算的值域引入  $2\pi$  突变点, 导致求出的相位分布存在相位跃变. 为了准确区分以上两种跃变, 必须先将量块的边缘识别出来, 以便进行相位解包, 实现波面统一. 图 2 是由干涉仪采集的静态单幅干涉条纹图像. 量块边缘的求取, 是通过去除干涉图上的干涉条纹, 如图 3, 对仅有量块边缘信息和背景信息的图像进行傅里叶变换, 选取适当的滤波器去除频谱分布中的正负一级频谱, 经二维逆傅里叶变换后, 采用边缘识别算子, 可获得量块边缘的线段分布<sup>[4]</sup>. 对求出的每一线段用最小二乘法进行直线拟合, 以减小由于噪声所带来的影响, 使得求出的边缘更加准确. 图 4 为求出的量块边缘分布.

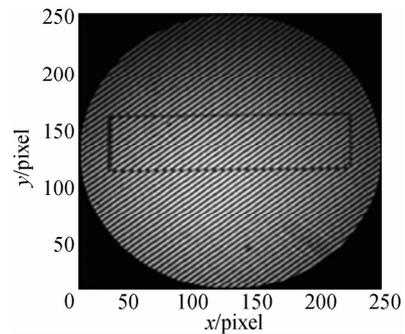


图 2 干涉仪采集的静态单幅干涉图  
Fig. 2 A static interferogram

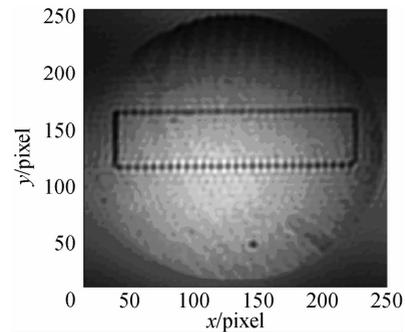


图 3 去除条纹信息后量块的边缘分布  
Fig. 3 Edge distribution removing fringe

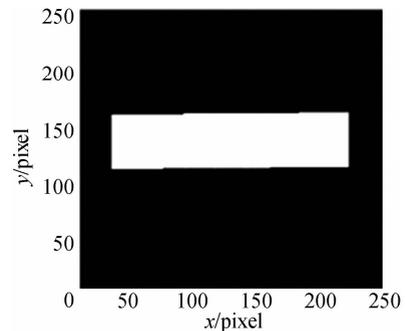


图 4 量块边缘分布  
Fig. 4 Edge distribution of gauge block

### 3.2 区域延拓

用傅里叶变换法对干涉条纹图处理时, 要求采

样序列长度满足 2 的  $n$  次方,所以处理的数据块呈矩形形状,如果数据块不是矩形区域,则要设法变成矩形区域.由于一般干涉图数据的有效区域是圆形的,这样的数据块不能直接使用二维 FFT 算法进行处理,因此必须对图像区域进行空域延拓<sup>[5]</sup>.

由于傅里叶变换原则上是对无限大的区间进行变换才不引起误差,但实际干涉图都有确定的大小和较清晰的边缘,如对于干涉图边缘处理不当,将导致傅里叶频谱产生波纹现象,产生延拓误差<sup>[6]</sup>.为了解决这个问题,本文采用基于二维 FFT 的迭代算法进行条纹延拓就可突破边缘的限制<sup>[7]</sup>,该算法的流程框图如图 5.

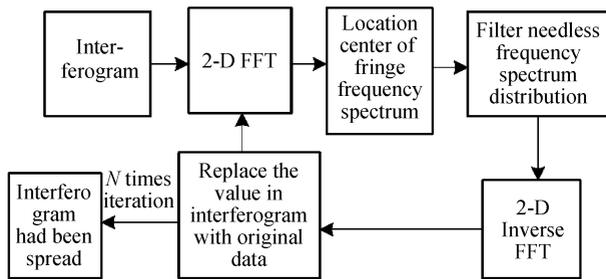
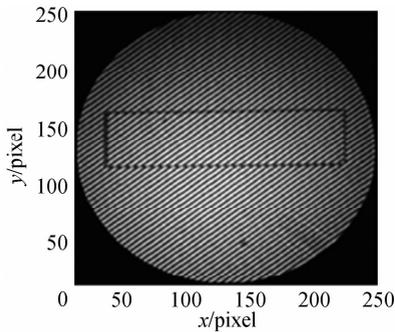


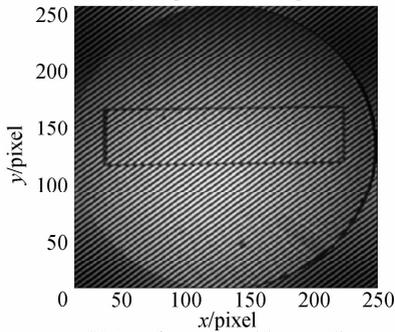
图 5 迭代延拓算法流程

Fig. 5 Iteration spreading arithmetic flow diagram

利用迭代延拓方法对干涉测试系统采集到的原始干涉条纹图 6(a)进行延拓处理,其延拓后的干涉图如图 6(b).可以看出,这两幅干涉条纹模式及纹理在干涉图内是一样的.



(a) Original interferogram



(b) Interferogram with spreading

图 6 原始干涉条纹图与延拓干涉条纹

Fig. 6 Original and spreading interferogram

### 3.3 波面统一

采用空间载频技术处理干涉图,所获得的带有量块长度信息的原始波面相位分布中,由于存在整个波面的相位跃变以及量块的边缘与辅助平面之间的跳跃,从而使得整个波面相位不连续,因此必须对包裹的原始波面相位去包裹,消除相位分布上的跃变点,实现波面统一.设由式(6)求得的包裹位相  $\phi_{i,j}$  在去包裹后对应的相位为  $\varphi_{i,j}$ ,则

$$\varphi_{i,j} = \phi_{i,j} + 2k\pi \quad (8)$$

式中:  $-\pi < \varphi_{i,j} < +\pi$ ,  $k$  为整数,  $i = 0, 1, 2, \dots, N-1, j = 0, 1, 2, \dots, N-1$

定义包裹算子  $W\{\varphi_{i,j}\} = \phi_{i,j}$ ,且

$$\begin{cases} \Delta_{i,j}^x = W(\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}) \\ (i=0, 1, 2, \dots, N-1, j=0, 1, 2, \dots, N-1) \\ \Delta_{i,j}^y = W(\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}) \\ (i=0, 1, 2, \dots, N-1, j=0, 1, 2, \dots, N-1) \end{cases} \quad (9)$$

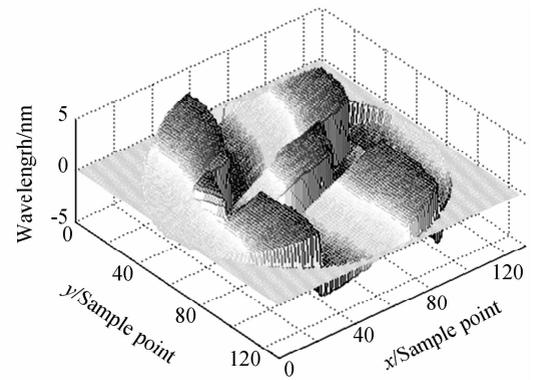
根据最小二乘法原理,去包裹相位为下列方程的解

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x)^2 + \\ \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y)^2 = \min \end{aligned} \quad (10)$$

求解方程(10),得

$$(\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}) + (\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}) = \rho_{i,j} \quad (11)$$

式(11)为满足 Neumann 边界条件的离散泊松方程,利用基于离散余弦变换(DCT)的最小二乘法进行快速求解,可得到去包裹相位值  $\varphi_{i,j}$ ,再对波面相位计算结果进行二次校正,可有效提高波面复原准确度<sup>[8]</sup>.图 7(a)是对原始干涉图处理后获得的包裹相位分布,图 7(b)为去包裹相位分布.



(a) Unwrapped phase distribution

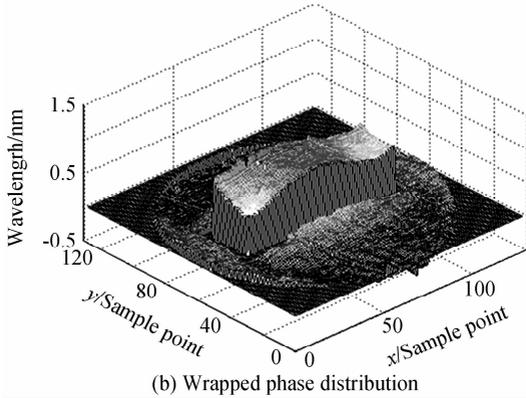


图7 干涉图的波面统一  
Fig. 7 Unwrapped and wrapped phase of interferogram

### 3.4 量块长度的获取

在图1的干涉测试系统中采集到一幅高质量的干涉图后,干涉条纹自动分析系统对条纹图像进行处理,可得到被测量块的表面形貌,如图8.由图可知,处理结果比较理想,首先量块边缘的识别效果十分理想,能非常清楚的区分平晶面和量块面;恢复出来的平晶面面形是非常理想的平面,与实际情况相符合;量块面与平晶面之间存在明显的跳跃;恢复出来的量块面是带有一定倾斜的平面,通常根据已知的波面应用最小二乘法拟合出最佳的参考面,用实测量块波面上的数据减去计算得到的最佳参考平面上对应点的数据,就消除了量块测量面倾斜的影响,得到量块和研合平晶面原始波面图.

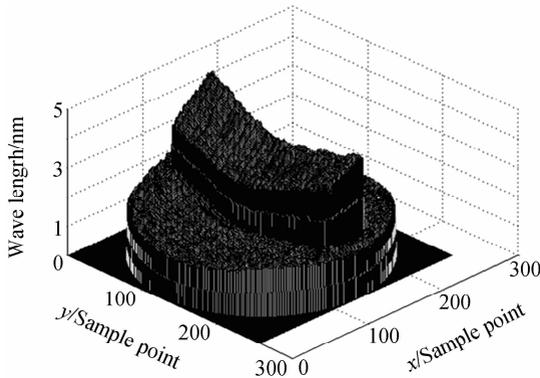


图8 波面面形分布  
Fig. 8 Wave-front surface shape distribution

针对量块面与平晶面之间存在的跳跃误差,应用图像处理技术,经过对干涉图进行阴影校正和滤波处理,可得到恢复后的波面图,如图9.在恢复的波面上提取量块表面和中间行数据,得到图10的量块表面面形分布图和图11所示的二维分布曲线图.经算法处理软件实际计算,当测量所用波长为 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 时,被测量块的干涉条纹小数数为 $\epsilon = 0.348$ .由图11可知,经图像处理后的波面二维曲线与这一结果基本吻合.在获取了干涉条

纹小数后,由小数重合法就可实现量块中心长度的测量.

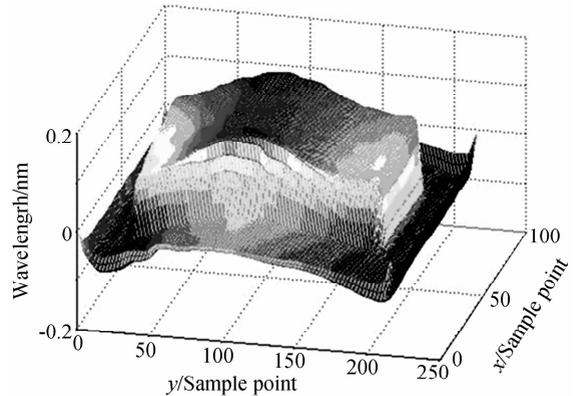


图9 恢复波面  
Fig. 9 Resumed wave-front

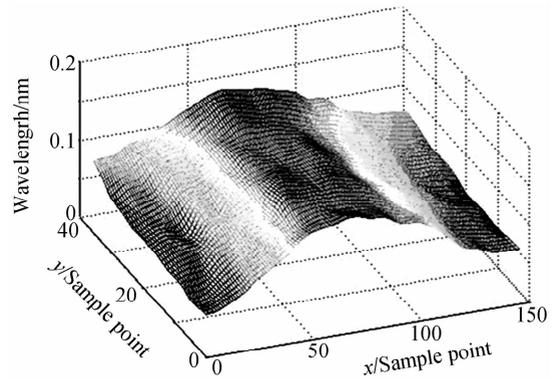


图10 量块表面波面  
Fig. 10 Gauge block surface wave-front

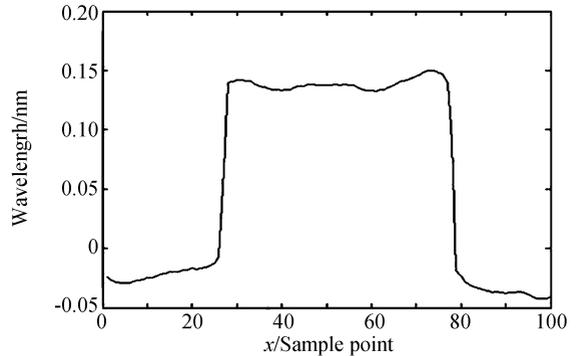


图11 中间行数据分布曲线  
Fig. 11 Distribution curve in a middle line data

## 4 结论

应用光干涉的原理获得带有量块长度信息的单幅载频干涉图,采用不同的原理及方法对干涉图进行了边缘识别、区域延拓,利用FFT方法提取波面相位分布,恢复出被测量块的表面面形,得到较为理想的波面分布.采用的这些干涉图处理关键技术,表明本原理方法具有较高的处理准确度,可完全适用于高等级量块参量的测量,数据处理是由软件自动完成的,实现了测试过程的自动化.

## 参考文献

- [1] MASSIG J H, HEPPNER J. 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.
- [2] KARAALIOGLU C, SKARLATOS Y. Measurement of thin film thickness by electronic speckle pattern interferometry [J]. *Opt Commun*, 2004, (234): 269-276.
- [3] GE Ai-ming, CHEN Jin-bang, CHEN Lei, et al. Automatic interference fringes processing in absolute measurement of central length of gauge block [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2000, **24**(3): 228-231. 葛爱明, 陈进榜, 陈磊, 等. 量块中心长度绝对测量中干涉条纹的自动判读[J]. *南京理工大学学报*, 2000, **24**(3): 228-231.
- [4] CHEN Jin-jun. Study on interference testing by FFT method [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004. 陈进军. FFT法进行干涉测试的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [5] SHUAI Gao-long, SU Jun-hong, YANG Li-hong, et al. Interferometric measurement method of thin film thickness based on FFT[C]. *SPIE*, 2008: 7283: 2k1-2k5.
- [6] HUANG Jing, ZHU Ri-hong, CHEN Lei. Interferogram spreading method based on exemplar matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1217-1223. 黄菁, 朱日宏, 陈磊. 基于样本块匹配的干涉图延拓方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1217-1223.
- [7] SU Jun-hong. Interferogram region spreading technology in spatial domain[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(4): 397-400. 苏俊宏. 干涉图空域延拓技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(4): 397-400.
- [8] YU Liang, SU Xian-yu. Phase unwrapping algorithm based on relative distance guidance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1235-1239. 余亮, 苏显渝. 一种相对距离导向的相位展开算法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1235-1239.

## Length Measurement of Whole Field Based on Spatial Carrier Frequency Interferometry

WANG Xiao-peng<sup>1,2</sup>, ZHU Ri-hong<sup>1</sup>, SU Jun-hong<sup>3</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>

(1 School of Electronic and Optical Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2 Xi'an Applied Optical Institute, Xi'an 710056, China)

(3 School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, 710032, China)

**Abstract:** Based on the study of basic principle of interferometry using 2-D FFT arithmetic, a method to measure the length is proposed. The gauge block, as a measured sample, is placed into the light path in a Twyman-Green interferometer, and the interference fringes are generated between the reference beam and the reflected beam of the tested block upper surface and the assistant plane respectively. The interferogram is collected by a image acquisition system. The algorithm processing software is used to achieve block edge identification, region extension, filtering, phase unwrapping etc. The length distribution with block information can be obtained in the whole field and the length of the gauge block can be obtained automatically. The results indicate that the proposed method has advantages of high precision, whole field and non-contact in the measuring.

**Key words:** Interferometry; Interferogram; Length; Fast Fourier Transform(FFT)



**WANG Xiao-peng** was born in 1962. Now he is a Ph. D. degree candidate at Nanjing University of Science & Technology, and His research interests focus on photoelectric technique & optical testing.



**ZHU Ri-hong** was born in 1964. As a Doctoral Supervisor, he is engaged in the research of optical metrology and testing technique.