

文章编号: 1001-3806(2010)04-0493-04

## 2 维载频条纹傅里叶变换轮廓术

杨初平<sup>1</sup>, 翁嘉文<sup>1</sup>, 杨玲玲<sup>2</sup>, 张子邦<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学 物理系, 广州 510642; 2. 韩山师范学院 化学系, 潮州 521041)

**摘要:** 为了在3维形貌测量中解决非连续物体所存在的非连续相位解包问题并提高测量精度, 提出采用2维网格光栅作为空间载频条纹的傅里叶变换轮廓术。首先应用2维傅里叶变换对2维光栅条纹图像进行频谱分析; 然后设计带通滤波器分离出两个1维变形光栅条纹, 在1幅变形网格光栅条纹得到两个1维光栅各自所对应的包裹相位分布; 最后应用查表法进行解包得到确定的调制相位分布, 给出了详细的理论推导和实验结果。结果表明, 采用2维网格光栅+查表相位解包法很好地解决了1维单一频率光栅条纹的低测量精度、1维双频光栅的频率混叠以及3维测量中高度不连续所存在相位解包问题, 该方法可行的。

**关键词:** 信息光学; 2维傅里叶变换轮廓术; 2维网格光栅; 3维形貌测量

**中图分类号:** O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.017

## Grid fringe pattern Fourier transform profilometry

YANG Chu-ping<sup>1</sup>, WENG Jia-wen<sup>1</sup>, YANG Ling-ling<sup>2</sup>, ZHANG Zi-bang<sup>1</sup>

(1. Department of Physics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Department of Chemistry, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China)

**Abstract:** In order to increase measurement precision and overcome discontinuous phase unwrapping in the 3-D shape measurement of discontinuous objects, an improved Fourier transform profilometry (FTP) was presented with a grid fringe pattern as spatial carrier-fringes. Two 1-D deformed grating patterns were extracted from the deformed grid fringe pattern using 2-D Fourier transform and fixed bandwidth filters. Two wrapped phases were obtained from these both one-dimension deformed patterns, respectively, and the corresponding unwrapped phases were achieved by means of a lookup table method. The experimental results show that the technique can overcome the low measurement precision using 1-D single frequency fringe pattern, the possible frequency overlaps using 1-D dual-frequency fringe pattern and tolerate the height discontinuity of the 3-D shape measurement; the above method is available.

**Key words:** information optics; 2-D Fourier transform profilometry; 2-D grid fringe pattern; 3-D shape measurement

### 引言

实现复杂面形的相位测量并改善3维形貌测量的精度, 一直受到人们的关注。无论是傅里叶变换轮廓术(Fourier transform profilometry, FTP)<sup>[1-4]</sup>、窗口傅里叶变换轮廓术<sup>[5-7]</sup>、相位测量轮廓术(phase measuring profilometry, PMP)<sup>[8]</sup>, 还是小波变换轮廓术(wavelet transform profilometry, WTP)<sup>[9-11]</sup>, 都是采用1维单一载频光栅条纹进行传感, 一幅变形光栅图像只能获得测量物体的1组测量数据, 测量信息和精度受到限制; FTP和WTP只需要一幅变形光栅图像, 适合于动态测

量; 而PMP需要多幅, 不利于动态测量; 存在相位包裹现象, 即相位解调技术直接得到的是 $-\pi$ 到 $+\pi$ 之间的相位; 必须借助枝叶型算法、直线扫描法等相位解包技术得到真实的相位分布, 但它们都只适用于相位连续分布情况。对于台阶、陡峭等包含相位突变表面, 提出了细胞自动机算法<sup>[12]</sup>、最小二乘法<sup>[13]</sup>、1维双频光栅法<sup>[14]</sup>等都取得了一定的成果。参考文献[15]中提出采用网格条纹的PMP, 两个条纹相互垂直, 频谱容易分离, 提供更多的测量信息, 为了分离两个方向1维条纹的包裹相位, 设计了一个固定带通滤波器。

为了实现相位展开, 获得更多的测量信息和满足动态测量需求, 作者提出采用2维网格光栅作为空间载频条纹的傅里叶变换轮廓术FTP, 采用带通滤波器分别从网格光栅中提取两个方向的条纹信息, 然后获得两个包裹相位, 结合查表进行相位解包。该方法具有如下特点: 与1维单频光栅比较, 采用2维网格光栅, 可以从两个相互垂直方向、以相同精度对物体面形

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(915106420100035)

作者简介: 杨初平(1970-), 男, 副教授, 研究方向为光电信息处理。

E-mail: yangchp@scau.edu.cn

收稿日期: 2009-08-24; 收到修改稿日期: 2009-10-21

进行测量,获得两倍测量数据,从而改善测量精度;由于2维网格光栅中两个方向相互垂直的1维光栅的频谱是分离的,避免1维双频光栅可能产生的频率混叠现象<sup>[12]</sup>;利用两个独立1维光栅所对应的包裹相位分布,结合查表法得到复杂物体真实的相位分布;只需要采集一幅变形光栅条纹,因而可应用于非连续物体动态3维测量。

## 1 2维傅里叶变换轮廓术

光学测量系统如图1所示,平面  $x-O-y$  与参考平

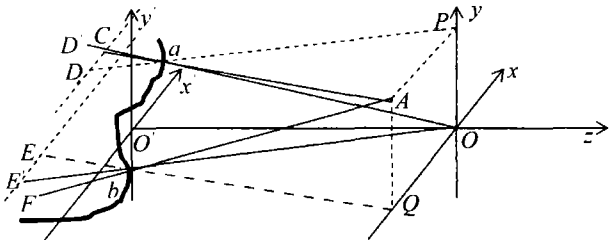


Fig.1 Schematic diagram of optical path

面  $x'-O'-y'$  的距离为  $OO' = L = 2800\text{mm}$ ;摄像机的入瞳中心位于坐标系  $x-O-y$  的原点  $O$ ,光轴为  $z$  轴;投影仪的出瞳中心位于平面  $x-O-y$  第2象限内的  $A$  点,光轴与摄像机的光轴平行; $A$  点距离  $y$  轴为  $\overline{AP} = d_x = 250\text{mm}$ ,距离  $x$  轴为  $\overline{AQ} = d_y = 140\text{mm}$ ;为了便于说明, $x, y$  方向(即纵向和横向)光栅分别测量待测物体表面上的  $a$  点、 $b$  点(对于测量  $a$  点,光栅条纹直接投影到参考平面是  $C$  点,测量  $a$  点经过摄像机  $O$  点在参考平面上的投影点是  $D'$ ,  $CD$  等于条纹移动量,  $\triangle aAP$  与  $\triangle aCD$  是相似的;类似地,对于测量  $b$  点,条纹移动量等于  $EF$ ); $x, y$  方向光栅测量的物体高度分别用  $h_x, h_y$  表示。

2维网格光栅条纹由数字投影仪投影在待测物体表面。由于2维网格光栅两个方向的1维光栅是相互独立的,下面分别进行分析讨论。

### 1.1 纵向光栅

2维网格光栅中的纵向和横向光栅条纹,分别受到待测物体的调制形成相应的变形光栅条纹。对纵向光栅(光栅线垂直  $x$  轴方向),由成像系统获得的变形光栅图像和基准光栅图像分别表示为<sup>[11]</sup>:

$$g_{d,x}(x,y) = r_d(x,y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{d,n} \times \exp\{j[2\pi n f_{0,x} x + \phi_{d,n}(x,y)]\} \quad (1)$$

$$g_{r,x}(x,y) = r_r(x,y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{r,n} \times \exp\{j[2\pi n f_{0,x} x + \phi_{r,n}(x,y)]\} \quad (2)$$

式中,  $f_{0,x}$  是  $x$  方向基准光栅图像的基频,  $r_r(x,y)$ ,  $r_d(x,y)$  分别是参考平面和待测物体表面的非均匀反

射率;  $\phi_{d,n}(x,y)$  是  $x$  方向条纹经测量物体调制的相位,  $\phi_{r,n}(x,y)$  是  $x$  方向条纹经参考平面调制的相位(下标  $n$  表示相应的谐波次数)。对(1)式、(2)式中每一行光栅图像进行傅里叶变换得到其频谱分布、滤波提取基频分量、逆傅里叶变换回到空域,分别得到变形光栅图像和基准光栅图像的基频信息(下标 1 表示与基频分量对应)表示:

$$g_{d,x,1}(x,y) = r_d(x,y) A_{d,1} \times \exp\{j[2\pi f_{0,x} x + \phi_{d,1}(x,y)]\} \quad (3)$$

$$g_{r,x,1}(x,y) = r_r(x,y) A_{r,1} \times \exp\{j[2\pi f_{0,x} x + \phi_{r,1}(x,y)]\} \quad (4)$$

(3)式与(4)式共轭式相乘取对数,分离虚部得到由物体高度所引起的调制相位  $\Delta\phi_x(x,y)$ <sup>[11]</sup>为:

$$\Delta\phi_x(x,y) = \phi_{d,1}(x,y) - \phi_{r,1}(x,y) = 2\pi f_{0,x} \overline{CD} \quad (5)$$

利用图1中三角形  $\triangle aAP$  和  $\triangle aCD$  相似的关系,得到  $x$  方向光栅调制相位  $\Delta\phi_x(x,y)$  和物体表面高度  $h_x(x,y)$  (测量的  $a$  点距离平面  $x'-O'-y'$  的高度) 的变换关系<sup>[11]</sup>:

$$h_x(x,y) = -\frac{L\Delta\phi_x(x,y)}{2\pi f_{0,x} d_x - \Delta\phi_x(x,y)} = \frac{L \frac{\Delta\phi_x(x,y)}{f_{0,x} d_x}}{2\pi - \frac{\Delta\phi_x(x,y)}{f_{0,x} d_x}} \quad (6)$$

### 1.2 横向光栅

对横向光栅,类似上述纵向光栅的分析过程,只要将(1)式~(6)式中的下标和  $2\pi n f_{0,x} x$  出现的  $x$  用  $y$  代替,利用图1中三角形  $\triangle BAQ$  和  $\triangle BEF$  的相似关系,获得  $y$  方向光栅调制相位  $\Delta\phi_y(x,y)$  和物体表面高度  $h_y(x,y)$  (测量的  $b$  点距离平面  $x'-O'-y'$  的高度) 的变换关系<sup>[11]</sup>:

$$h_y(x,y) = -\frac{L\Delta\phi_y(x,y)}{2\pi f_{0,y} d_y - \Delta\phi_y(x,y)} = \frac{L \frac{\Delta\phi_y(x,y)}{f_{0,y} d_y}}{2\pi - \frac{\Delta\phi_y(x,y)}{f_{0,y} d_y}} \quad (7)$$

比较(6)式和(7)式,两个方向的条纹是对同一个测量点进行测量,故  $h_x(x,y) = h_y(x,y)$ ;若  $f_{0,x} = f_{0,y}$ ,  $d_x = d_y$ ,用2维网格光栅可以获得两个精度相同的调制相位,测量数据是采用1维单频光栅的两倍,从而改善测量精度;由于2维网格光栅两个相互垂直的光栅相互独立,频谱相互分离,可以避免1维双频光栅的频谱混叠现象。

### 1.3 查表法相位解包

由于是在相同的实验系统中对同一物体进行测

量,故  $h_x(x,y) = h_y(x,y)$ , 比较(6)式、(7)式,得到:

$$\frac{\Delta\phi_y(x,y)}{f_{0,y}d_y} = \frac{\Delta\phi_x(x,y)}{f_{0,x}d_x} \quad (8)$$

傅里叶变换轮廓术是使用反正切函数计算相位的,因此,得到的是包裹相位  $\Delta\varphi_x(x,y), \Delta\varphi_y(x,y)$ 。要得到与高度对应的物理上的真实相位  $\Delta\phi_x(x,y), \Delta\phi_y(x,y)$ , 必须对包裹相位进行展开。 $\Delta\phi_x(x,y), \Delta\phi_y(x,y)$  与  $\Delta\varphi_x(x,y), \Delta\varphi_y(x,y)$  的关系为:

$$\begin{cases} \Delta\phi_x(x,y) = \Delta\varphi_x(x,y) + 2\pi n_x \\ \Delta\phi_y(x,y) = \Delta\varphi_y(x,y) + 2\pi n_y \end{cases} \quad (9)$$

把(9)式代入(8)式,得到:

$$\left( \frac{f_{0,x}d_x}{f_{0,y}d_y} n_y - n_x \right) = \frac{1}{2\pi} \times \left[ \Delta\varphi_x(x,y) - \frac{f_{0,x}d_x}{f_{0,y}d_y} \Delta\varphi_y(x,y) \right] \quad (10)$$

式中,  $\Delta\varphi_x(x,y)$  和  $\Delta\varphi_y(x,y)$  可以通过相位解调算法获得,  $d_x, d_y, f_{0,x}, f_{0,y}$  是已知的实验系统参量, 因此(10)式左边是已知量, 右边  $n_x$  和  $n_y$  为两个未知整数, 方程不能直接求解。但  $n_x, n_y$  为整数, 可以定义<sup>[14]</sup>:

$$\Omega = \frac{1}{2\pi} \left[ \Delta\varphi_x(x,y) - \frac{f_{0,x}d_x}{f_{0,y}d_y} \Delta\varphi_y(x,y) \right] \quad (11)$$

$$T(n_x, n_y) = \left( \frac{f_{0,x}d_x}{f_{0,y}d_y} n_y - n_x \right) \quad (12)$$

对于任意的  $n_x, n_y$ , 根据(12)式可以列出一表格, 表格中给出的值为(11)式可能值, 可以通过查表的方法在表格中找出与  $\Omega$  相等的值, 其对应的  $n_x, n_y$  就是(9)式所要求的值。由于  $n_x, n_y$  可以取任意值, 相位值完全可确定, 因此在理论上可以测量的范围是无限的。

## 2 2维傅里叶变换频谱分析和分离

### 2.1 2维网格光栅

在参考平面上, 2维网格光栅可以表示为(下标 2r 表示与参考平面对应的2维网格光栅)<sup>[15]</sup>:

$$g_{2r}(x,y) = r_r(x,y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{m,n} \exp \{ j[2\pi n f_{0,x} x + n\phi_{0,x}(x,y)] \} \exp \{ j[2\pi m f_{0,y} y + m\phi_{0,y}(x,y)] \} \quad (13)$$

经过物体调制后, 2维变形网格光栅(下标 2d 表示与测量物面对应的2维网格光栅)可以表示为:

$$g_{2d}(x,y) = r_d(x,y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{m,n} \exp \{ j[2\pi n f_{0,x} x + n\phi_x(x,y)] \} \exp \{ j[2\pi m f_{0,y} y + m\phi_y(x,y)] \} \quad (14)$$

式中,  $A_{m,n}$  是傅里叶级数的系数;  $f_{0,x}, f_{0,y}$  分别是  $x, y$  方向的基准频率;  $\phi_x(x,y), \phi_y(x,y)$  分别是  $x, y$  方向与

物体高度有关的调制相位;  $\phi_{0,x}(x,y), \phi_{0,y}(x,y)$  分别是  $x, y$  方向条纹投影在参考平面上的调制相位。

### 2.2 2维频谱分析和分离

为了从2维网格光栅条纹中提取物体的两个调制相位, 无论是基准光栅还是变形光栅, 必须从中把两个1维光栅条纹准确地提取出来。为此, 采用2维傅里叶变换对2维网格光栅条纹进行频谱分析。条纹强度分布  $f(x,y)$  的2维傅里叶变换定义如下:

$$F(\xi, \eta, \mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \times \exp(-j\xi x) \exp(-j\eta y) dx dy \quad (15)$$

为了滤取  $x$  方向(纵方向)的1维条纹频谱, 在2维频谱坐标系中,  $x$  方向带通滤波器的带宽等于  $y$  轴上频谱分布曲线左右两侧第1个最小值点间的距离  $\Delta y$  (如图3所示); 同理以带宽  $\Delta x$  滤取  $y$  方向光栅频谱; 将滤取的  $x, y$  方向的频谱分别进行1维逆傅里叶变换, 获得  $x, y$  方向变形光栅。 $x, y$  方向带通滤波器的频率响应函数分别为:

$$\begin{cases} H_x(f_x, f_y) = \text{rect}\left(\frac{f_y}{\Delta y}\right) = \begin{cases} 1, & (|f_y| \leq \Delta y/2) \\ 0, & (\text{others}) \end{cases} \\ H_y(f_x, f_y) = \text{rect}\left(\frac{f_x}{\Delta x}\right) = \begin{cases} 1, & (|f_x| \leq \Delta x/2) \\ 0, & (\text{others}) \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\text{rect}$  表示矩形函数。

## 3 实验

根据(12)式制作的表格  $T(n_x, n_y)$  如表1表示。计算机产生一个  $x, y$  方向空间周期为4个像素的2维网格正弦电子光栅, 通过数字投影仪投射到待测物体上。经过物体调制, 产生一个2维变形网格光栅, 如图2所示。2维变形网格光栅的2维傅里叶频谱分布和  $x, y$  方向带通滤波器的带宽如图3所示。由于  $x, y$  方向的频谱是相互独立的, 不会出现1维双频光栅产生的频谱混叠现象; 分别采用  $x, y$  方向的带通滤波器, 滤取  $x, y$  方向变形光栅频谱, 然后逆傅里叶变换得到相应的变形光栅, 完成了对  $x, y$  方向变形光栅信息的分离提取, 分别如图4a、图4b所示。将滤波得到的两个方向的1维光栅图像分别提取包裹相位, 进而应用查表相位解包法进行解包处理, 得到  $x, y$  方向的解包相位, 分别如图5a、图5b所示。由于测量误差和噪声影响, 获得的两个包裹相位代入(11)式和(12)式并不能严格相等, 采用计算机自动检测最小值  $\min |\Omega - T(n_x, n_y)|$  来确定真实的  $n_x, n_y$  的值。

Table 1 Value of  $T(n_x, n_y)$

$T(n_x, n_y)$	$n_y$										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-3.928	-2.142	-0.357	1.429	3.214	5	6.786	8.571	10.357	12.142	13.928
-4	-4.928	-3.142	-1.357	0.429	2.214	4	5.786	7.571	9.357	11.142	12.928
-3	-5.928	-4.142	-2.357	-0.571	1.214	3	4.786	6.571	8.357	10.142	11.928
-2	-6.928	-5.142	-3.357	-1.571	0.214	2	3.786	5.571	7.357	9.142	10.928
-1	-7.928	-6.142	-4.357	-2.571	-0.786	1	2.786	4.571	6.357	8.142	9.928
0	-8.928	-7.142	-5.357	-3.571	-1.786	0	1.786	3.571	5.357	7.142	8.928
1	-9.928	-8.142	-6.357	-4.571	-2.786	-1	0.786	2.571	4.357	6.142	7.928
2	-10.928	-9.142	-7.357	-5.571	-3.786	-2	-0.214	1.571	3.357	5.142	6.928
3	-11.928	-10.142	-8.357	-6.571	-4.786	-3	-1.214	0.571	2.357	4.142	5.928
4	-12.928	-11.142	-9.357	-7.571	-5.786	-4	-2.214	-0.429	1.357	3.142	4.928
5	-13.928	-12.142	-10.357	-8.571	-6.786	-5	-3.214	-1.429	0.357	2.142	3.928

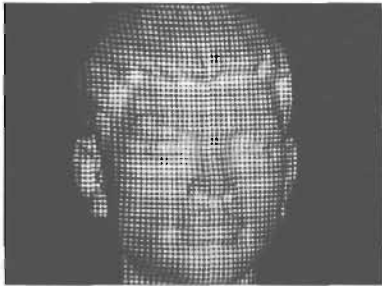


Fig. 2 Deformed grid fringe pattern

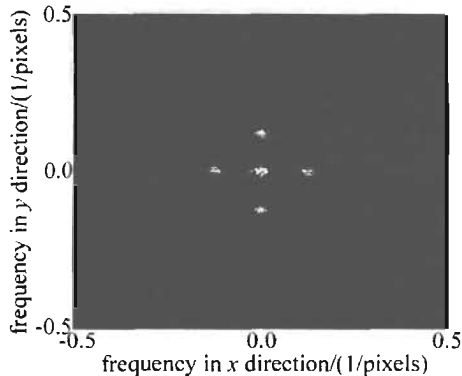


Fig. 3 2-D spectrum of deformed grid fringe pattern and bandwidth of filters

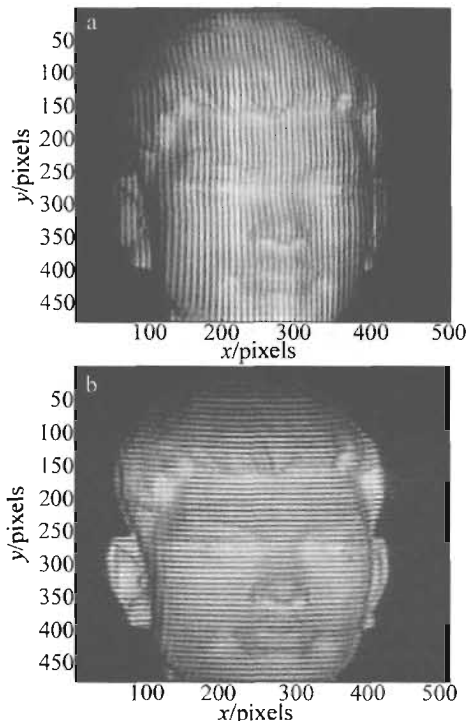


Fig. 4 a—vertical deformed fringe pattern b—horizontal deformed fringe pattern

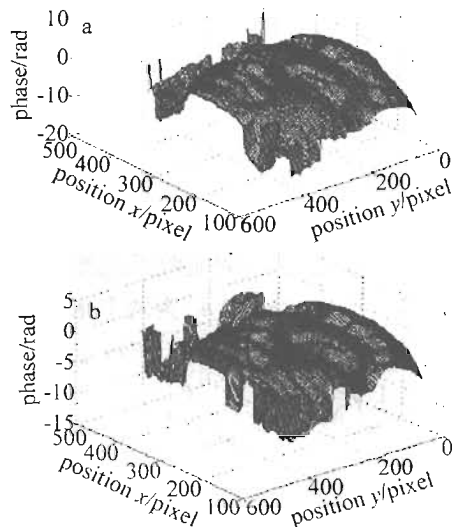


Fig. 5 a—vertical unwrapped phase b—horizontal unwrapped phase

### 4 结论

提出应用2维网格载频条纹傅里叶变换轮廓术,把复杂面形的高度信息调制在一个2维网格光栅条纹中,设计合适的带通滤波器分离提取两个方向的变形条纹信息,获得两倍测量数据,提高了测量精度;可以避免1维双频光栅可能产生的频谱混叠;结合查表进行相位解包,有效地测量陡峭物体的3维面形。只需要采集1幅变形光栅图像,适合动态测量。

### 参考文献

[1] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. Appl Opt, 1983, 22 (24):3977-3982.

[2] XIAO Y Sh, SU X Y, ZHANG Q C, et al. 3-D surface shape restoration for the breaking surface of dynamic process[J]. Laser Technology, 2006, 30(3):258-261 (in Chinese).

[3] WANG X H, HE X D, FU Y J. The real-time measurement by two-frequency grating [J]. Laser Technology, 2007, 31 (4): 384-386 (in Chinese).

[4] MAO X F, CHEN W J, SU X Y. Analysis on an improved fourier transform profilometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1): 97-102 (in Chinese).

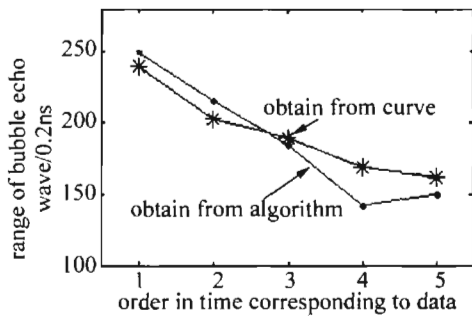


Fig. 8 The parallel figure of width between the result of algorithm processing and actual measurement

信息,则可以掌握舰船的速度和距离信息,该方向有待进一步研究探讨。

#### 4 结论

通过分析海上采用激光探测目标船尾流所获得后向散射光信号的特征,采用极值筛选法对去噪平滑后的舰船尾流后向散射光信号进行了处理,讨论了在极值筛选法中矩形窗窗宽的选择对尾流“负峰”的影响,即矩形窗窗宽越小,影响尾流“负峰”筛选确定的干扰“负峰”越多,矩形窗窗宽越大,获取的干扰“负峰”则越少,但当矩形窗窗宽达到一定值时,则会丢失尾流“负峰”。因此,矩形窗窗宽的选取要适中。通过对尾流“负峰”可能位置进行分析,对不同位置采用不同方法,以此筛选出尾流“负峰”,并由此获得舰船尾流的有无信息以及位置信息。同时,研究讨论了海上所测得的信号去噪后,与水体后向散射光信号按照最小均方误差准则进行拟合相减获得的纯尾流后向散射光信

号,构造了纯尾流后向散射光信号的简单模型,利用极值筛选获得的尾流“负峰”的峰值信息,通过进一步的处理获得了尾流厚度相关信息。

#### 参 考 文 献

- [1] ZHANG X H, LEI X H, RAO J H. Study of homing means for laser-wake-homing torpedoes [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 494-500 (in Chinese).
- [2] ZHU D H, ZHANG X H. Ship wake detection based on laser Doppler effect [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 298-300 (in Chinese).
- [3] YI H, HE Ch, CHEN Ch Y. Defense technologies against wake homing torpedo [J]. *Torpedo Technology*, 2007, 15(4): 6-7 (in Chinese).
- [4] JI Y J, HE J H, CHENG L Y. Scatter light of bubble and distribution of bubble size [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 414-416 (in Chinese).
- [5] ZHENG Y. The research on the high speed data acquisition and analysis system of underwater lidar [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008: 97-101 (in Chinese).
- [6] RAO J H, YANG K Ch, ZHANG X H, *et al.* Detecting simulative ship bubbles wake by pulsed laser [J]. *Optic & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(3): 40-41 (in Chinese).
- [7] HUANG P, SONG W A. Weak signal processing based on wavelet analysis [J]. *Journal of Taiyuan Teachers College (Natural Science Edition)*, 2005, 4(1): 37-39 (in Chinese).
- [8] LI Sh X, LIU L Y. Design of wavelet domain median filter [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2003, 32(1): 18-21 (in Chinese).
- [9] ZHANG Y, WUANG Y D, GUO Sh X. Improving the measure precision of extensometer based on wavelet transform [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(8): 931-932 (in Chinese).
- [10] ZHANG J Sh, LIN Sh Y, MIAO R C, *et al.* Wavelet analysis on managing of scattered optical semaphore from bubble films [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3): 557-559 (in Chinese).
- [10] ZHONG J G, WENG J W. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(19): 2560-2562.
- [11] SUN J, CHEN W J, SU X Y, *et al.* Study the measurement range of wavelet transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 647-653 (in Chinese).
- [12] TANG S X, SU X Y. Utilization of cellular automata phase unwrapping method in 3-D sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(1): 112-116 (in Chinese).
- [13] MA M, ZHANG D Sh. Least-square method for phase unwrapping [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(1): 94-96 (in Chinese).
- [14] WENG J W, ZHONG J G. Application of wavelet transform profilometry in bi-frequency grating fringe [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(5): 603-608 (in Chinese).
- [15] ZHENG R H, WANG Y X, ZHANG X R, *et al.* Two-dimensional phase-measuring profilometry [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(6): 954-958.

(上接第 496 页)

- [5] WENG J W, ZHONG J G. Application of gabor transform to 3-D shape analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 993-996 (in Chinese).
- [6] QIAN K M, WANG H X, GAO W J. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: theoretical analyses [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(29): 5408-5419.
- [7] ZHONG J G, ZENG H P. Multiscale windowed Fourier transform for phase extraction of fringe patterns [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(14): 2670-2675.
- [8] XIAN T, SU X Y. Area modulation grating for sinusoidal structure illumination on phase measuring profilometry [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(8): 1201-1208.
- [9] CHEN F X, HE X Y. Instantaneous three-dimensional profile measurement based on temporal wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(12): 1803-1806 (in Chinese).