

S变换轮廓术中消除条纹非线性影响的方法

钟 敏 陈文静 蒋模华

(四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610064)

摘要 S变换是短时傅里叶变换和小波变换的延伸和推广,是一种无损可逆的非平稳信号时频分析方法。它不仅具有线性、多分辨率和逆变换唯一性等特点,而且其反变换与傅里叶变换保持着直接的联系。在S变换中,以简谐波作为基波,以可以同时同时进行伸缩和平移的高斯函数作为窗函数。同短时傅里叶变换相比,S变换的时频分辨率可以同时达到最佳,同小波变换相比,S变换谱同傅里叶变换谱保持着直接联系。讨论了S变换在受到非线性因素影响下的变形条纹解相中的应用,推导了相应的条纹图的S变换公式;分别研究了S变换“脊”分析方法和S变换滤波分析方法在非线性因素影响下的变形条纹解相中的应用,完成了相应的计算机模拟和实验验证,并将S变换三维重建效果与傅里叶变换和小波变换的结果进行对比,由此表明了S变换具有更好的恢复效果。

关键词 测量;信息光学;时频分析;S变换轮廓术;CCD非线性

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1112003

Elimination of Nonlinear Error in Deformed Fringe Pattern by S-Transform Profilometry

Zhong Min Chen Wenjing Jiang Mohua

(Opto-Electronic Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract S-Transform, a hybrid and extension of the short-time (or windowed) Fourier transform and the wavelet transform, is one of lossless and reversible time-frequency analysis methods, which is suitable to analyze non-stationary signals. It not only has advantages of linearity, multi-resolution and uniqueness of inverse, but also its inverse transform directly keeps in contact with the Fourier transform. In S-Transform, the harmonic wave is used as a basic element function, and the window function is a Gaussian function with the ability of both dilation and translation, which is controlled by a frequency parameter. Compared with the short-time (or windowed) Fourier transform, it has optimized the time-resolution and frequency resolution simultaneously. Compared with wavelet transform, it keeps in contact with the Fourier transform. S transform in the application of demodulation of fringe pattern with nonlinear parts has been deeply discussed, S-transform expression of the deformed fringe pattern considering by nonlinear effects is deduced and two ways, including S transform filtering method and S transform ridge method are proposed, which are used to eliminate the nonlinear error in three-dimensional optical measurement based on the structured light projection. Computer simulations and experiments have verified the proposed two methods. Compared with Fourier transform and wavelet transform, the proposed methods based on S transform have better reconstruction results.

Key words measurement; information optics; time-frequency analysis; S-transform profilometry; nonlinearity of CCD

OCIS codes 120.6650; 200.3050; 120.2650; 350.6980; 190.4400

1 引言

光学信息处理具有容量大、速度快、精度高的特

点。其中,基于条纹投影的光学三维传感技术是一种非接触、全场、高精度的光学测量方法,已广泛应

收稿日期: 2011-05-03; **收到修改稿日期**: 2011-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(60838002,60677028)资助课题。

作者简介: 钟 敏(1987—),女,硕士研究生,主要从事光学三维传感方面的研究。E-mail: 623468168@qq.com

导师简介: 陈文静(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光学三维传感和光学信息处理等方面的研究。

E-mail: chenwj0409@scu.edu.cn

用于生物医学、工业检测、实物仿形和国防高新技术等领域。目前常用的方法包括:需要多帧条纹的相位测量轮廓术^[1,2]和单帧条纹图的傅里叶变换轮廓术^[3]、短时傅里叶变换(STFT)轮廓术和小波变换(WT)轮廓术等^[4,5],而单帧条纹图的相位解算方法是实时三维面形重建的首选方法。

傅里叶变换是一种线性的积分变换,最初作为热过程的解析分析工具被提出。它将信号从时域映射到频域,从而获得信号的全空间频谱。此频谱是对信号在时间轴上的统计平均结果,不能确定信号的瞬间时域特性,适用于分析平稳信号,却难以描述时变非平稳信号。针对傅里叶变换的不足,出现了时频分析技术,以研究处理非平稳信号。它们的共同特点是将一维的时域信号或空域信号映射到二维时频平面上,获得信号的时频分布,从而可以从信号的时频分布中确定信号包含的参数。STFT和WT是常用的时频分析方法^[6~8]。对于STFT,其窗口函数的尺寸是固定的,很难同时兼顾低频信号段和低频信号段的时间和频率分辨率。WT通过对母小波函数进行尺度控制和平移控制,形成一系列的小波基函数。通过分析小波基函数与待处理信号不同位置的局部信号之间的相似性来处理信号。WT虽然具有变分辨率的特性,但由于变换的冗余性而使其不存在惟一的逆变换。为此,一种无损可逆的非平稳信号时频分析方法——S变换,由美国地球物理学家 Stockwell 等^[9]于1996年提出,它是STFT和WT的延伸和推广。S变换的窗函数是一个随频率作伸缩变化的高斯函数,在低频处有较宽的窗,而在高频处有较窄的窗。S变换不但具有线性、多分辨率、逆变换唯一性等特点,而且它所获得的二维时频谱与傅里叶变换保持着直接的联系,已在盲信号分离、地震波分析、医学图像处理、数据压缩和系统故障检测等很多领域得到广泛应用^[10~14]。目前已开展S变换在基于结构照明型三维测量中的应用研究^[15~17]。

随着数字投影设备的出现和发展,在结构照明的三维传感中,常用商用投影仪作为条纹投影设备,通过计算机编程控制投影仪投影结构条纹到被测物体的表面上。商用投影仪的非线性对投影条纹的影响以及 CCD 的非线性的影响在测量中都不容忽略。本文推导了基于条纹投影的光学三维测量在受到非线性效应影响时变形条纹图的 S 变换公式,研究了基于“脊”处理方法和滤波处理方式的 S 变换轮廓术

在消除非线性效应中的应用,并将它们的重建结果与傅里叶变换和 WT 的结果进行对比,由此表明 S 变换具有更好的恢复效果。

2 结构光投影三角测量法基本原理

典型的三角测量原理测量光路^[18]如图1所示,图中的O点是成像光轴与投影光轴的交点, d 和 L_0 分别是投影系统的出瞳P2与成像系统的入瞳I2间的距离以及I2与O点间的距离, D 为被测物体上的一个点。参考平面R垂直于成像系统的光轴I1I2,A、C分别是光线P2D和I2D在参考平面R上的交点。将光栅的像投影在放置于平面上的被测物体上,从CCD相机获得的变形条纹图中便可以重建物体的高度分布 $h(x,y)$ 。

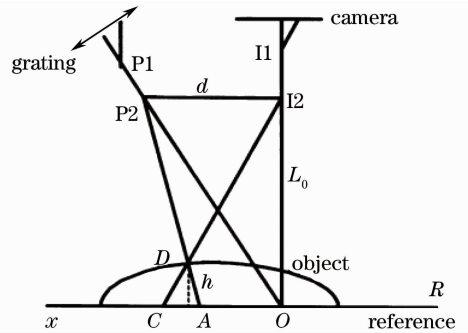


图1 FTP测量光路图

Fig. 1 Optical geometry of FTP measurement

正弦光栅像投影在待测物体上后,由CCD获取的变形结构光场为

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

式中 $a(x,y)$ 是背景光场; $b(x,y)$ 为条纹对比度; f_0 是光栅的载频; $\varphi(x,y)$ 为由物体高度分布 $h(x,y)$ 引起的相位调制。同样,当正弦光栅像投影在参考平面R上 $[h(x,y) = 0]$,所获取的变形结构光场表示为

$$g_0(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[2\pi f_0 x + \varphi_0(x,y)], \quad (2)$$

式中 $\varphi_0(x,y)$ 是初始相位,可见 $\Delta\varphi(x,y) = \varphi(x,y) - \varphi_0(x,y)$ 表示由放置在参考面上的被测物体高度分布引起的条纹相位调制。

从条纹图中解调出 $\Delta\varphi(x,y)$ 后,根据三角测量原理的光路图,考虑到实际测量中 $L_0 \gg h(x,y)$,所以得到 $\Delta\varphi(x,y)$ 与 $h(x,y)$ 的近似关系为

$$\Delta\varphi(x,y) \approx \frac{2\pi f_0 d}{L_0} h(x,y). \quad (3)$$

3 S 变换的基本原理

3.1 一维连续 S 变换原理

由 Stockwell 等^[9]提出的 S 变换,结合了 STFT 和 WT 的优点,是一种新型的时频分析方法。一维信号 $h(t)$ 的 S 变换表示为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}\right] \times \exp(-i2\pi ft) dt, \quad (4)$$

式中 f 是频率, $\frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}\right]$ 为受到频率 f 控制的高斯窗口, τ, t 都是时间变量, τ 控制时间 t 轴上高斯窗口位置的移动。可见, S 变换中,简谐波在时间域仅作伸缩变换,而高斯函数既伸缩又平移,并且高斯窗的宽度同频率 f 成反比关系。

由于高斯函数的傅里叶变换仍是高斯函数,利用傅里叶变换关系, S 变换也可表示为

$$S(\tau, f) =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} H(\alpha + f) \exp\left(-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}\right) \exp(i2\pi\alpha\tau) d\alpha, \quad (5)$$

式中 $H(\alpha + f)$ 是 $h(t)$ 的傅里叶谱在频域内平移后的分布, α 为频率变量。可见 S 变换可以利用快速傅里叶变换算法方便、快速地进行计算。在某一固定位置 τ_0 , $S(\tau_0, f)$ 称为“局部频谱”,是关于 f 的一维函数;由(4)式,对于某个固定的频率 f_0 , $S(\tau, f_0)$ 称为“声音片段”, S 变换有一个重要性质: S 变换的时频信息与傅里叶频谱有着内在联系,所有位置“局部频谱”的叠加表示为 $\int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau = H(f)$ 。

例如对于图 2(a)所示的条纹图(含噪声)的傅里叶谱(正频率部分)为图 2(b),图 2(a)的 S 变换谱的分布如图 2(c)。如果将 S 谱沿图 2(c)中红色箭头方向进行叠加,便得到如图 2(d)所示的频谱图。

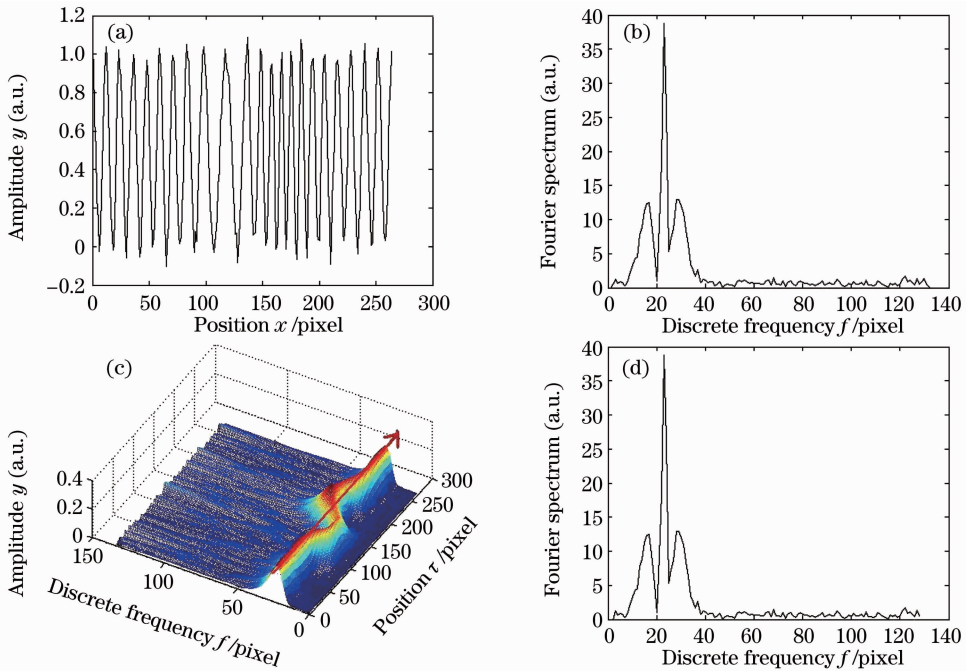


图 2 条纹的 S 变换系数和傅里叶谱之间的关系。(a)一维条纹;(b)傅里叶变换谱;(c) S 变换系数的三维分布;(d) S 谱沿时间轴积分所得的频谱

Fig. 2 Relation between S transform coefficients and Fourier transform spectrum of the fringe pattern. (a) 1D fringe pattern; (b) Fourier transform spectrum; (c) 3D display of S transform coefficients; (d) spectrum obtained by adding the local spectrum

3.2 条纹中非线性因素的数学描述

在理想状态下,投影正弦结构光场到被测物体表面后,由 CCD 获取的空间变形光场由(1)式表示。实质上,商用投影仪和 CCD 均存在非线性,当考虑非线性效应的影响时,变形条纹表示为

$$g'(x, y) =$$

$$[a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \varphi(x, y))]^\gamma, \quad (6)$$

式中 γ 为非线性因子。商用投影仪的 γ 取值通常在 1.8 到 2.5 之间^[8],测量系统中,再考虑 CCD 的非线性, γ 的值可能会更大。写成多项式分布形式,考虑到 3 阶非线性影响,变形结构光场(保留前四项)表示为^[19,20]

$$g' = g + k_1 g + k_2 g^2 + k_3 g^3, \quad (7)$$

式中 $g = g(x, y)$, k_1, k_2, k_3 为比例因子。将(1)式代入(7)式化简可得

$$\begin{aligned} g' = & C_0 + C_1 \{ \exp[i(2\pi f_0 x + \varphi)] + \\ & \exp[-i(2\pi f_0 x + \varphi)] \} + \\ & C_2 \{ \exp[i2(2\pi f_0 x + \varphi)] + \\ & \exp[-i2(2\pi f_0 x + \varphi)] \} + \\ & C_3 \exp\{ [i3(2\pi f_0 x + \varphi)] + \\ & \exp[-i3(2\pi f_0 x + \varphi)] \}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中

$$\begin{cases} C_0 = a + k_1 a + k_2 \left(a^2 + \frac{1}{2} b^2 \right) + k_3 \left(a^3 + \frac{3}{2} a b^2 \right) \\ C_1 = \frac{b}{2} \left(1 + k_1 + 2k_2 a + 3k_3 a^2 + \frac{3}{2} k_3 b^2 \right) \\ C_2 = \frac{1}{4} b^2 (k_2 + 3k_3 a) \\ C_3 = \frac{1}{8} k_3 b^3 \end{cases} \quad (9)$$

3.3 S 变换处理条纹的非线性影响

3.3.1 S 变换滤波解相方法

如(8)式所示,考虑到条纹中的非线性影响时,条纹频谱分布中包含有零频、正负基频以及正负二次谐波频率和正负三次谐波频率。当被测物体面形分布复杂时,非线性会导致变形条纹的各级傅里叶谱出现混叠,采用傅里叶变换轮廓术,滤波操作不能获得正确的基频分量,从而导致被测物体三维面形

重建错误。S 变换滤波解相方法可以看作一种基于脊引导的自适应窗口傅里叶变换相位提取方法:根据 S 变换系数,找出脊所对应的调节窗口宽度的参数 f , 自适应地获得最佳匹配窗口来提取变形条纹的局部信息,由于局部条纹的频谱相对于整个条纹的频谱而言更简单,因此,可对位置 τ 处的“局部频谱”进行滤波,再将所有的局部基频进行叠加,从而最大限度地抑制变形条纹的频谱混叠并准确提取基频分量,由此获得相位信息和用于引导相位展开的调制度信息。由于在窗函数中引入频率参数 f , 相对于短时傅里叶变换, S 变换在空域和频域具有最佳的分辨率^[17]。

设 $g'(x, y)$ 沿 x 方向的傅里叶变换表示为 $G'(\alpha, y)$ [简称为 $G'(\alpha)$]:

$$\begin{aligned} G'(\alpha) = & C'_0(\alpha) + C'_1(\alpha - f_0) + C'_1^*(\alpha + f_0) + \\ & C'_2(\alpha - 2f_0) + C'_2^*(\alpha + 2f_0) + C'_3(\alpha - 3f_0) + \\ & C'_3^*(\alpha + 3f_0), \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $C'_k(\alpha)$ 表示 $C_k \exp(ik\varphi)$ 的傅里叶频谱($k = 1, 2, 3$), $C'_k^*(\alpha)$ 表示 $C'_k(\alpha)$ 的复共轭。根据(5)式可得

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau = & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G'(\alpha + f) \times \\ & \exp\left(-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}\right) \exp(i2\pi\alpha\tau) d\alpha d\tau, \end{aligned} \quad (11a)$$

如果在位置 τ 处,选择合适的滤波器,滤出 $S(\tau, f)$ 中局部基频分量,再进行重构,可得

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau = & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C'_1(\alpha + f - f_0) \exp\left(-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}\right) \exp(i2\pi\alpha\tau) d\alpha d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} C'_1(\alpha + f - f_0) \times \\ & \exp\left(-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}\right) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp(i2\pi\alpha\tau) d\tau \right] d\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} C'_1(\alpha + f - f_0) \exp\left(-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}\right) \delta_{\alpha,0} d\alpha = C'_1(f - f_0), \end{aligned} \quad (11b)$$

由于 α 和 f 都是频率变量, $C'_1(\alpha - f_0)$ 和 $C'_1(f - f_0)$ 实质上都表示条纹的正基频分量。滤波器的中心在“脊”所在位置 f_{rid} , 低频方向和低频方向上的延伸宽度分别由 $f\omega_{low}$ 和 $f\omega_{high}$ 决定。 $f\omega_{high}$ 和 $f\omega_{low}$ 分别局部基频的低端截止频率和高端截止频率。当条纹存在频谱混叠时,由(11b)式得到的基频信息更为准确。

3.3.2 S 变换“脊”分析方法

考虑非线性影响的变形结构光场中[如(8)式和(9)式所示],当窗口中心滑至于某一位置 e 处时,可认为是被高斯窗函数局部化的条纹段在傅里叶变换基函数的支撑集上作变换。考虑到 $a(x)$ 和 $b(x)$ 是缓慢变化的,在 e 处,将 $\varphi(x)$ 作一级泰勒级数近似可得

$$\varphi(x) = \varphi(e) + \varphi'(x)(x - e), \quad (12)$$

把(8)式、(12)式代入(4)式可得在非线性和噪声因素影响下的 S 变换系数为

$$\begin{aligned} S'(e, f) = & S_0(e, f) + S_1(e, f) + S_1^*(e, f) + S_2(e, f) + \\ & S_2^*(e, f) + S_3(e, f) + S_3^*(e, f), \end{aligned} \quad (13)$$

式中

$$\left\{ \begin{array}{l} S_0(e, f) = C_0 \exp(-i2\pi fe) \exp(-2\pi^2) \\ S_1(e, f) = \frac{1}{2} C_1 \exp\{i[2\pi(-f + f_0)e + \varphi(e)]\} \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f + f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right]^2\right\} \\ S_1^*(e, f) = \frac{1}{2} C_1 \exp\{-i[2\pi(f + f_0)e + \varphi(e)]\} \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f - f_0 - \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right]^2\right\} \\ S_2(e, f) = \frac{1}{2} C_2 \exp\{i[2\pi(-f + 2f_0)e + 2\varphi(e)]\} \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f + 2\left(f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right)\right]^2\right\}, \\ S_2^*(e, f) = \frac{1}{2} C_2 \exp\{-i[2\pi(f + 2f_0)e + 2\varphi(e)]\} \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f - 2\left(f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right)\right]^2\right\} \\ S_3(e, f) = \frac{1}{2} C_3 \exp\{i[2\pi(-f + 3f_0)e + 3\varphi(e)]\} \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f + 3\left(f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right)\right]^2\right\} \\ S_3^*(e, f) = \frac{1}{2} C_3 \exp\{-i[2\pi(f + 3f_0)e + 3\varphi(e)]\} \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f - 3\left(f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right)\right]^2\right\} \end{array} \right. \quad (14)$$

由于正负半轴的频率是对称的,只需在正频率($f > 0$)范围内计算S变换谱,(14)式中 $S_0 \approx S_1^* \approx S_2^* \approx S_3^* \approx 0$,则

$$\begin{aligned} S'(e, f) &= S_1(e, f) + S_2(e, f) + S_3(e, f) = \\ &\frac{1}{2} C_1 \exp\{i[2\pi(-f + f_0)e + \varphi(e)]\} \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f + f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right]^2\right\} + \\ &\frac{1}{2} C_2 \exp\{i[2\pi(-f + 2f_0)e + 2\varphi(e)]\} \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f + 2\left(f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right)\right]^2\right\} + \\ &\frac{1}{2} C_3 \exp\{i[2\pi(-f + 3f_0)e + 3\varphi(e)]\} \exp\left\{-\frac{2\pi^2}{f^2} \left[-f + 3\left(f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right)\right]^2\right\}, \end{aligned} \quad (15)$$

$S'(e, f)$ 分别在 $f_{e1} = f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}$, $f_{e2} = 2\left(f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right)$, $f_{e3} = 3\left(f_0 + \frac{\varphi'(e)}{2\pi}\right)$ 可以获得三个局部极大值。 e 遍历每个位置,得到三条“脊”线。根据 C_1, C_2, C_3 因子的大小,(15)式表明存在强度不同的三条“脊”线,有用的基频分量 f_{e1} 对应的“脊”线最亮。 e 点处的相位信息从最明亮的“脊”处确定,表示为

$$\varphi_S(e, f_e) = \arctan\left[\frac{\text{Im } S(e, f_e)}{\text{Re } S(e, f_e)}\right] = 2\pi(-f + f_0)e + \varphi(e), \quad (16)$$

式中 $\text{Im}[S(e, f_e)]$ 是 S 变换的虚部, $\text{Re}[S(e, f_e)]$ 则为 S 变换的实部。从而可以得到 $\varphi(e)$, 由于计算 $\varphi_S(e, f_e)$ 用到了反正切,其结果截断在 $-\pi$ 到 π 之间,需要进行相位展开才可得到连续的相位分布为

$$\varphi(e) = \text{unwrap}[\varphi_S(e, f_e) + 2\pi(f_e - f_0)e]. \quad (17)$$

e 点遍历空间轴 x , 可以得到一维相位分布 $\varphi(x)$ 。

4 计算机模拟

计算机模拟验证了 S 变换的滤波法和“脊”处理方法抑制条纹中非线性的影响,并与傅里叶变换以及 WT 分析方法作了对比。模拟过程中,非线性因子设置为 $\gamma=2.9$, 条纹载频为 $f_0=1/(12 \text{ pixel})$, 根据图 1, 系统参数 $d=190 \text{ cm}$, $L_0=540 \text{ cm}$, 条纹图尺寸为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。考虑到与实际测量情况一致,在参考和变形条纹图中多加入了 22 dB 的噪声,参考条纹 I_{re} 和变形条纹 I_{de} 的表达式可分别

表示为

$$I_{\text{re}} = [a + b \cos(2\pi f_0 x)]^\gamma + n(x, y), \quad (18)$$

$$I_{\text{de}} = \{a + b \cos\{2\pi f_0 [x + Z(x, y) \tan \theta]\}\}^\gamma + n(x, y), \quad (19)$$

$a = b = 0.5$, $\tan \theta = d/L_0$ 。 $n(x, y)$ 是条纹中的噪声分布,模拟物体 $Z = 7.35 \text{ peaks}(x, y)$, 如图 3(a) 所示。 peaks 为 Matlab 软件平台提供的函数,具体表达式为

$$\begin{aligned} \text{peaks}(x, y) &= 3 \times (1 - x)^2 \times \exp[-x^2 - \\ &(y + 1)^2] - 10 \times (x/5 - x^3 - y^5) \times \\ &\exp(-x^2 - y^2) - (1/3) \times \exp[-(x + 1)^2 - y^2], \end{aligned} \quad (20)$$

根据(19)式,受到物体 Z 调制,且包含非线性因子的变性条纹如图 3(b) 所示。由于模拟的物体的高度变化率较大,考虑非线性效应的影响及较严重的噪声污染,条纹的基频分量同高次谐波分量混叠,对全局条纹的傅里叶谱进行滤波,不能获得正确的基

频分量。为了清楚地表示频谱的混叠情况,图 4(a)画出了条纹中一行(第 64 行)的正频率部分分布。由于频谱混叠的存在,导致恢复的物体面形存在错误,如图 4(b)所示,重建面形的误差分布如图 4(c)所示。

采用 S 变换方法分析该条纹图,对条纹图中的每一行计算其一维 S 变换谱,例如第 64 行的 S 变换系数如图 5(a)和 5(b)所示(彩图见电子版),图 5(a)为灰度显示和 5(b)为三维显示。三维分布

图 5(b)中,如山脉的一个红色带是 S 变换的“脊”线。考虑非线性因素的影响时,理论上具有 3 条“脊”线,但是由于 3 次非线性项的系数较小,第 3 条“脊”线不明显。由于条纹中添加的噪声和非线性会引起在 S 变换谱中的能量的分散,导致在 S 变换谱中存在一些垂直于脊线的分布^[21]。如果从局部 S 谱中滤出“脊”附近的频谱后再沿图 5(b)中红色箭头方向进行叠加,便得到如图 5(c)所示的频谱图。对局部谱的滤波操作,可以很好地抑制噪声的影响。

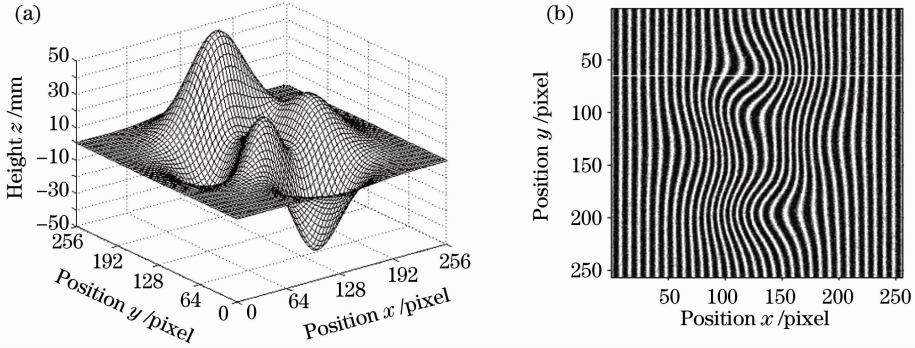


图 3 模拟。(a)模拟物体;(b)变形条纹(白线对应第 64 行)

Fig. 3 Simulation. (a) The simulated object; (b) the deformed fringe pattern (white line stands for the 64th row)

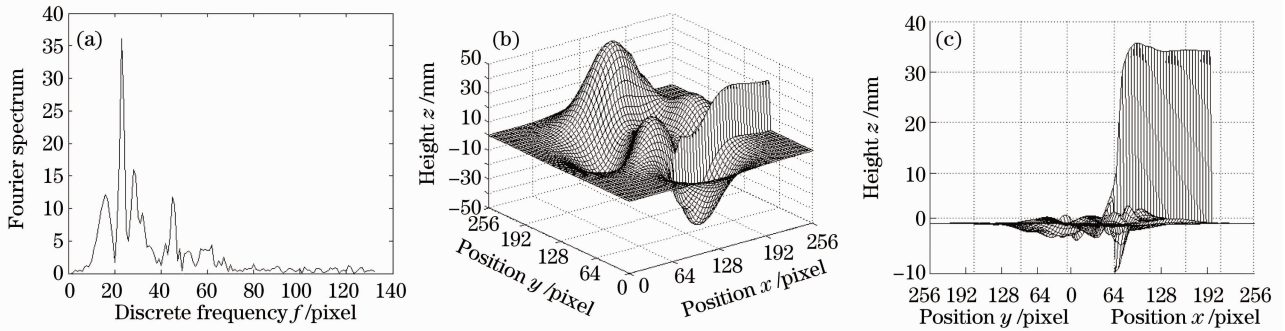


图 4 傅里叶变换结果。(a)第 64 行的 FT 频谱;(b) FTP 重建的面形分布;(c) FTP 重建的面形的误差分布

Fig. 4 Reconstruction result by FTP method. (a) Spectrum of the 64th row of the fringe pattern; (b) the reconstructed surface by FTP; (c) the error distribution of the surface reconstructed by FTP

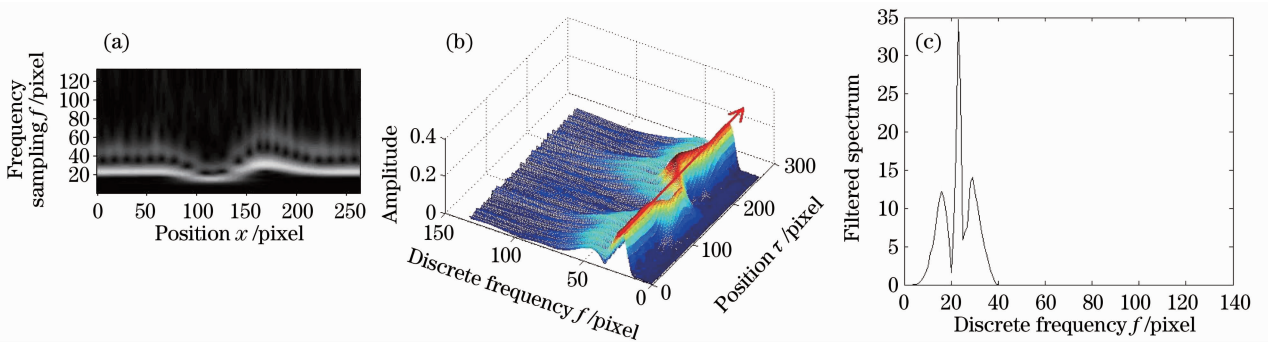


图 5 第 64 行 S 变换滤波分析。(a) S 变换系数的灰度图;(b) S 变换系数的三维分布;(c) 滤波后 S 谱沿时间轴积分所得的频谱

Fig. 5 Analysis on filtered spectrum of S transform of the 64th row of the fringe pattern. (a) Grey display of S transform coefficients; (b) 3D display of S transform coefficients; (c) spectrum obtained by adding the filtered local S spectrum

采用S变换“脊”处理方法,选取最亮的一条“脊”进行相位提取,即使考虑噪声和非线性影响,S变换谱中这些垂直于脊线的分布强度较小,通常不会影响到该“脊”线提取的准确性。所以采用S变换“脊”处理方法能得到较好的三维重建效果,如

图6(a)和图6(b)分别表示重建结果和误差分布,标准误差为0.41。

用S变换滤波方法对图3(b)所示的条纹图进行分析,这里选取的滤波器为平顶汉宁窗,窗口函数描述为

$$\omega = \begin{cases} 0.5\{1 + \cos[\pi(f - f_{rid} + f_{w_{low}}/3)/(2f_{w_{low}}/3)]\} & f_{rid} - f_{w_{low}} \leq f < f_{rid} - f_{w_{low}}/3 \\ 1 & f_{rid} - f_{w_{low}}/3 \leq f \leq f_{rid} + f_{w_{high}}/3 \\ 0.5\{1 + \cos[\pi(f - f_{rid} - f_{w_{high}}/3)/(2f_{w_{high}}/3)]\} & f_{rid} + f_{w_{high}}/3 < f \leq f_{rid} + f_{w_{high}} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (21)$$

滤波器的中心在“脊”所在位置 f_{rid} ,低频方向和高频方向上的延伸宽度分别由 $f_{w_{low}}$ 和 $f_{w_{high}}$ 决定。 $f_{w_{high}}$ 和 $f_{w_{low}}$ 分别局部基频的低端截止频率和高端截止频率。滤波操作能抑制了非线性和高频噪

声对基频的影响,从局部S变换谱中重构的基频分量很准确,图6(c)、(d)分别表示S变换滤波法重建的面形分布和误差分布,标准误差为0.22。

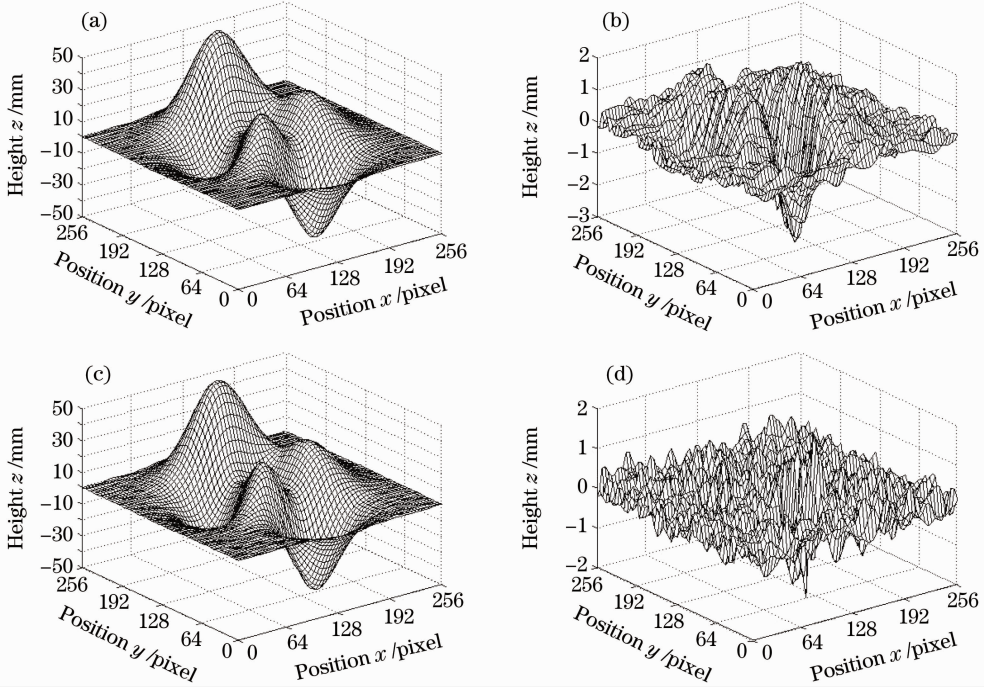


图6 S变换结果。(a) S变换“脊”处理方法重建面形分布;(b) S变换“脊”处理方法重建面形的误差分布;
(c) S变换滤波处理方法重建面形分布;(d) S变换滤波处理方法重建面形的误差分布

Fig. 6 Reconstruction results by S transform. (a) The reconstructed surface by S transform ridge method; (b) the error distribution by S transform ridge method; (c) the reconstructed surface by S transform filtering method; (d) the error distribution by S transform filtering method

对同一个条纹对象,也采用了WT轮廓术对其进行了处理。复Morlet小波在空域和频域都具有很好的局部特性,常作为解调变形条纹图的分析小波,采用cmor1-1小波处理得到的重建面形分布和误差分布如图7(a)、(b)所示,标准误差为0.57。

WT的处理过程与S变换的“脊”处理方法类似,从(4)式中可以看出,S变换是在增加了一个频率控制因子 $|f|$ 的复Morlet WT。从两种方法的重建结果对比中可见,S变换“脊”处理方法即使在被测物体变化陡峭处,也能准确重建面形分布。

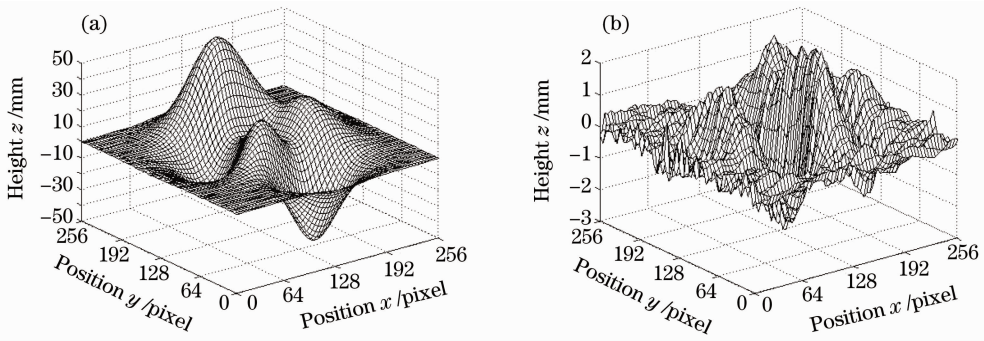


图 7 小波变换结果。(a)小波变换方法重建面形分布;(b)小波变换方法重建面形的误差分布

Fig. 7 Reconstruction results from wavelet transform. (a) The reconstructed surface by wavelet transform method; (b) the error distribution by wavelet transform method

5 实 验

为了验证上述的S变换方法,进行了实验验证。实验装置的原理示意图如图8,实验中的系统参数 $d=30\text{ cm}$, $L_0=100\text{ cm}$ 。计算机产生正弦条纹图,投影到参考平面上,CCD所采集的条纹受到投影仪和CCD的非线性性的共同影响,存在非线性效应,图9(a)为CCD采集到的参考条纹中截取的 $1024\text{ pixel}\times 1024\text{ pixel}$ 的区域,为了清楚显示,图9(b)画出了其中一行(第512行)对应的一维条

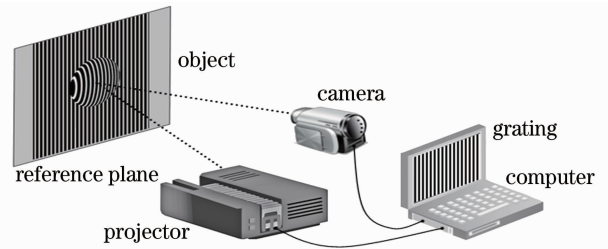


图 8 实验装置的原理示意图

Fig. 8 Schematic of experimental equipment

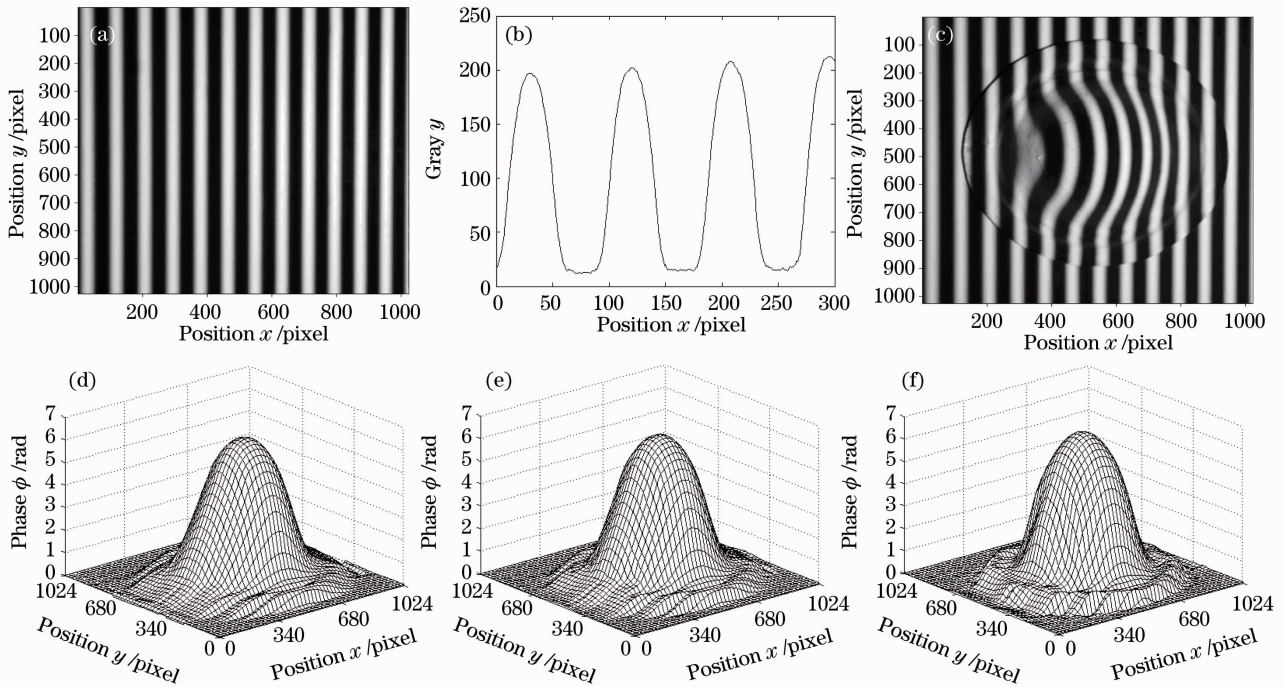


图 9 实验。(a) CCD 采集的参考形条纹图;(b)第 512 行受非线性影响的正弦条纹部分分布;(c) CCD 采集的变形条纹图;(d)小波变换方法重建相位分布;(e) S 变换“脊”处理方法重建相位分布;(f) S 变换滤波处理方法重建相位分布

Fig. 9 Experiment. (a) Reference fringe pattern taken by CCD; (b) partial distribution to the 512th row of sinusoidal fringe affected by nonlinearity; (c) deformed fringe pattern taken by CCD; (d) the reconstructed phase distribution by wavelet transform method; (e) the reconstructed phase distribution by S transform ridge method; (e) the reconstructed phase distribution by S transform filtering method

纹分布(几个周期),由于明显的非线性效应存在,条纹严重偏离正弦分布。被测物体是一个倒扣在参考平面上的碗,由游标卡尺测得碗的最大高度: $h = 25.08 \text{ mm}$ 。从 CCD 采集到的变性条纹中截取的 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的区域如图 9(c)所示。由于非线性因素的影响较大,全局频谱发生混叠,采用傅里叶变换轮廓术不能得到好的测量结果。采用 WT 方法和 S 变换对其进行处理。小波变换的重建相位结果如图 9(d)所示,利用 S 变换的取“脊”处理方法如图 9(e),S 变换滤波的方法如图 9(f)所示。由于相位与物体的高度分布之间存在着一个比例关系,如(3)式所示,利用系统参数可以将相位转换成高度分布。采用 WT,S 变换“脊”处理以及 S 变换滤波方法所得到的物体最大高度分别为: $h_{wt} = 24.22 \text{ mm}; h_{rst} = 24.52 \text{ mm}; h_{lst} = 25.09 \text{ mm}$ 。特别是 S 变换的滤波处理结果,碗边缘部分的细节保留得更为完好,而 WT 和 S 变换的取“脊”方法所得到的结果在不同程度上都模糊了细节部分,其边缘部分都变得比较圆润光滑。

6 结 论

S 变换结合了 STFT 和 WT 的优点,具有线性变换、多分辨率和逆变换唯一性等特点。用于基于结构光的复杂物体三维面形测量时,即使条纹存在频谱混叠,也可以获取较为准确的基频信息。本文推导了考虑测量系统的非线性效应时,变形条纹图的 S 变换表达式,研究了基于“脊”处理和滤波处理的 S 变换轮廓术消除条纹图非线性效应的方法。同 WT 相比较,基于“脊”处理 S 变换轮廓术可以看作是受频率因子 $|f|$ 控制的复 Morlet WT;同傅里叶变换相比较,基于滤波处理的 S 变换轮廓术,对“局部频谱”进行单独的滤波操作再进行基频重构,可以解决了傅里叶变换中的频谱混叠问题,并且在空域和频域均能获得最佳分辨率。对比 S 变换的重建结果与傅里叶变换和 WT 的结果,表明 S 变换具有更好的恢复效果。

参 考 文 献

- 1 Yu Ruizhi, Cao Yiping. A three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1139~1143
喻睿智,曹益平.一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J].*光子学报*,2008,**37**(6):1139~1143
- 2 Sai Siva Gorthi, Pramod Rastogi. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 133~140

- 3 Xianyu Su, Wenjing Chen. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2001, **35**(5): 263~284
- 4 Qian Kemao, Haixia Wang, Wenjing Gao. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: theoretical analyses [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(29): 5408~5419
- 5 Sun Juan, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Study the measurement range of wavelet transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 647~653
孙娟,陈文静,苏显渝等.小波变换轮廓术的测量范围研究 [J].*光学学报*,2007,**27**(4):647~653
- 6 J. Zhong, J. Weng. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2560~2562
- 7 Lei Huang, Qian Kemao, Bing Pan *et al.*. Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 141~148
- 8 Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. 63~66
拉斐尔·C·冈萨雷斯,理德·E·伍兹.数字图像处理(第二版) [M].阮秋琦,阮宇智.北京:电子工业出版社,2007.63~66
- 9 R. G. Stockwell, L. Mansinha, R. P. Lowe. Localization of the complex spectrum: the S-transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, **44**(4): 998~1001
- 10 Wang Limei, Sun Fengrong, Zhang Mingqiang *et al.*. Application of S transform in myocardial contrast echocardiograph image de-noising [J]. *Computer Engineering*, 2009, **35**(13): 216~218
王丽梅,孙丰荣,张明强等.S变换在心声学造影图像降噪中的应用 [J].*计算机工程*,2009,**35**(13):216~218
- 11 Liu Zhenming, Gu Hanming, Zhan Fenglin. Application of S-transform time-frequency analysis in seismic prospecting for karst caves under tunnel [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2010, **7**(1): 50~54
刘振明,顾汉明,詹凤林.S变换时频分析在隧道岩溶地震勘探解释中的应用 [J].*工程地球物理学报*,2010,**7**(1):50~54
- 12 Ma Jianqing, Li Qingchun, Fan Jinsheng *et al.*. Rayleigh wave dispersion analysis based on S transform [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2010, **32**(3): 319~323
马见青,李庆春,樊金生等.基于 S 变换的瑞利面波频散分析 [J].*地球科学与环境学报*,2010,**32**(3):319~323
- 13 Wang Tiewang, Yu Xianhai, Liu Mingqian *et al.*. The attenuation of power interference based on S-transform [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2010, **34**(4): 532~535
汪铁望,于相海,刘明乾等.基于 S 变换的工频干扰压制 [J].*物探与化探*,2010,**34**(4):532~535
- 14 Liu Haipeng, Li Yanjun, Zhang Ke. Time-frequency filtering of radar signal based on generalized S transform [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2010, **40**(5): 23~25
刘海鹏,李言俊,张科.基于广义 S 变换进行雷达信号时频滤波去噪 [J].*航空计算技术*,2010,**40**(5):23~25
- 15 Mansinha L., Stockwell R. G., Lowe R. P.. Patten analysis with two dimensional spectral localization; application of two dimensional S transform [J]. *Physica A*, 1997, **239**(1-3): 286~295
- 16 Serhat Özder, Özlem Kocahan, Emre Coskun *et al.*. Optical phase distribution evaluation by using an S-transform [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6): 591~593
- 17 Jiang Mohua, Chen Wenjing, Zheng Zhiping. Research of phase demodulation technique based on S-transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412001
蒋模华,陈文静,郑志平.基于 S 变换的解相技术研究 [J].*光学学报*,2011,**31**(4):0412001
- 18 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the

- automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**: 3977~3982
- 19 Su Ke, Chen Wenjing. Analyzing wavelet transform profilometry in the restraining CCD nonlinear characteristic [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(1): 37~40
苏 轲, 陈文静. 小波变换轮廓术抑制 CCD 非线性的分析[J]. 光学技术, 2009, **35**(1): 37~40
- 20 Zhao Huandong, Zhu Bijin, Li Zhineng. Effect on the Fourier transform profilometry due to the CCD nonlinearity[J]. *Optical Instruments*, 2000, **22**(5): 7~13
赵焕东, 祝必进, 李志能. CCD 的非线性效应对改进型傅里叶变换轮廓术的影响[J]. 光学仪器, 2000, **22**(5): 7~13
- 21 Ervin Sejdic, Igor Djurovic, Jin Jiang. A window width optimized S-transform [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008. 1~13

栏目编辑:何卓铭