

S 变换轮廓术测量范围的研究

钟 敏 陈文静 苏显渝 郑 毅

(四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610064)

摘要 S 变换结合了窗口傅里叶变换和小波变换的优点, 适合于解调具有非平稳特性的变形条纹图。实际应用时, S 变换处理的对象为离散条纹。计算 S 变换系数时, 利用了信号的傅里叶谱的平移形式, 即将相邻频域周期内的频谱信息用于系数计算。当抽样、非线性以及物体高度变化导致频谱出现混叠时, 会影响 S 变换的重建效果。从离散信号频域分析角度, 研究了上述原因对 S 变换的影响; 推导了在考虑数字视频投影仪和 CCD 非线性影响时, 离散变形条纹的 S 变换的频谱表达式以及 S 变换轮廓术的测量范围。给出了 S 变换轮廓术的抽样条件及结构条件。计算机模拟和实验验证了该结论。

关键词 信息光学; 时频分析; S 变换轮廓术; 抽样

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1012004

Study of the Measurement Range of S-Transform Profilometry

Zhong Min Chen Wenjing Su Xianyu Zheng Yi

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

Abstract S-transform, combining the advantages of both the windowed Fourier transform and the wavelet transform, is suitable for the demodulation of non-stationary signal such as the deformed fringe pattern. The fringe patterns analyzed by S-transform are discrete in application. During the calculation of the S-transform coefficients, the Fourier spectrum of the signal is translated, which means that the frequency information of the adjacent island is used. The frequency overlapping caused by sampling, nonlinearity or height variation of the measured object affects the three-dimensional reconstruction result. The effects from the above factors in calculating S-transform coefficients are exhaustively studied from the point of view of the frequency analysis. The frequency-domain description and the measurement range of S-transform coefficients of digital signal are deduced when the nonlinearity from both the projector and CCD exists. The sampling condition and the structure condition are given as well. Both computer simulation and experimental results verify the analysis.

Key words information optics; time-frequency analysis; S-transform profilometry; sampling

OCIS codes 200.3050; 070.4790; 110.6980; 100.2960

1 引 言

基于条纹投影的光学三维测量方法具有快速、准确、无损等特点, 近几十年在关键技术已取得了重大突破, 并广泛应用于生物医学、机器视觉、工业检测以及航空航天等领域。常见的投影结构光法分为采用多帧条纹处理的相位测量轮廓术(PMP)^[1]和采用单帧条纹处理的傅里叶变换轮廓术(FTP)^[2-3]、窗口傅里叶变换轮廓术(WFTP)/短时

傅里叶变换轮廓术(STFTP)^[4-5]、小波变换轮廓术(WTP)^[6-7]以及 S 变换轮廓术(STP)^[8]等。相位测量轮廓术通过相互间具有一定相位差的多幅变形条纹计算相位, 并根据相位和高度的映射关系获得被测物体的三维面形。而 FTP、WFTP、WTP 以及 STP 利用调制和解调的原理, 仅由一帧或两帧条纹图即可重建物体的三维面形, 更有利于进行实时和动态的三维面形测量。

收稿日期: 2013-04-05; **收到修改稿日期**: 2013-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61177010)、四川省学术和技术带头人培养资金(2012DTPY011)

作者简介: 钟 敏(1987—), 女, 博士研究生, 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(通信联系人)

傅里叶变换(FT)自 1982 年提出以来,由于全场、简单和快速的特点,备受关注,成为了三维传感技术中最重要和活跃的研究领域之一。但 FT 缺乏局部分析的能力,无法单独分析和解决局部条纹出现的错误。由此,研究人员引入了可以进行局部分析和处理信号的窗口傅里叶变换(WFT),有效地提高了处理信号的能力。由于该方法采用固定大小的滑动窗口,在解调频率变化大的信息时,很难同时获得较好的频率分辨率和空间分辨率^[9]。小波变换(WT)具有多分辨率特性以及良好的时频局域分析能力^[10],克服了 WFT 的缺陷,能够自适应地反映条纹图的低频和低频成分,但仅能估计局部的功率谱,并且与傅里叶变换联系不大。由此,Stockwell 等^[8]于 1996 年提出一种能同时估计局部振幅谱和相位谱的方法——S 变换。它可以根据局部频率的大小自适应调节窗口尺寸,与傅里叶频谱保持直接联系的同时,又兼顾小波多分辨率分析的特点。目前已应用于地球物理、电力电能、医学图像分析、基于结构光投影三维测量等研究中^[11-12]。

基于 S 变换的三维面形测量包括 S 变换“脊”方法(STR)和 S 滤波方法(STF)。这两种方法的 S 变换系数计算的过程中,需要对平移后信号频谱进行加权滤波,再进行相应的处理。由于 STP 处理的是由 CCD 获取的离散且很可能同时受到 CCD 和数字视频投影系统非线性影响的条纹。离散化会引起信号频谱的周期重复,而非线性可能导致信号在一个频谱周期内的混叠。这都将会影响 S 变换系数计算的准确性,由此引入的误差对 STP 的影响不能忽视。本文从离散信号频域分析角度,理论推导了离散、非线性变形条纹的 S 变换的频谱表达式,研究了 STP 中周期内瞬时频谱混叠和由抽样引起的周期内瞬时频谱混叠的影响,并对离散 STP 的测量范围做出了深入讨论。

2 结构光投影三角测量法基本原理

基于三角原理的主动光学三维测量的原理示意图如图 1 所示^[12],其中 P_1 为投影系统出瞳, P_2 为成像系统入瞳。投影装置投射正弦条纹图在被测物体的表面上,在与投影光轴成一定夹角的方向上,理想的成像仪器观察到受物体表面高度调制的变形条纹和参考面上的条纹可分别表示为

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

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

式中 f_0 为空间载频, $a(x, y)$ 为背景光场, $b(x, y)$ 为条纹对比度, $\varphi(x, y)$ 为由物体高度分布 $h(x, y)$ 引起的位相调制, $\varphi_0(x, y)$ 为初始相位。可见,由被测物体的高度分布所引起的条纹调制相位可表示为 $\Delta\phi(x, y) = \phi(x, y) - \phi_0(x, y)$ 。根据三角测量原理,结合实际情况 $\varphi(x, y)$ 极大于 $\varphi_0(x, y)$,在远心投影光路条件下,被测物体的高度和相位的关系简化为

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

式中 L_0 和 d 均为系统的结构参数。

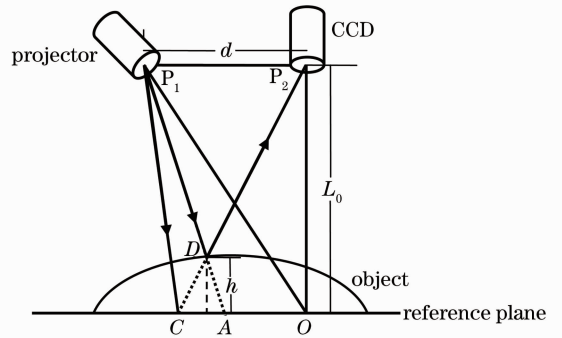


图 1 FTP 测量光路图

Fig. 1 Scheme of the FTP measuring geometry

3 一维连续 S 变换原理

一维信号 $h(t)$ 的一维 S 变换定义为^[8]

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

频率 f 控制着高斯窗 $\frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}\right]$ 的尺寸,时间变量 τ 控制高斯窗口中心在时间 t 轴的移动。可见,滑动的高斯窗以频率 f 成反比的关系自适应地调节窗口尺寸。

实际 S 变换系数计算过程中, $S(\tau, f)$ 利用快速傅里叶变换进行计算^[8]:

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

式中 α 为频率变量, $H(\alpha + f)$ 是 $h(t)$ 的傅里叶频谱在频域内平移后的分布,S 变换频谱是信号的平移后傅里叶谱的加权滤波处理结果。S 变换的时频分布形式还与傅里叶频谱存在着内在联系,即所有位

置局部频谱的叠加表示为 $\int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau = H(f)$ 。可见,不论是 STR 还是 STF 方法,要得到正确的 S 变换系数和从 S 变换的局部谱中重建信号的傅里叶频谱,都要保证信号的傅里叶频谱在平移过程中无误差的引入。而实质上,计算机处理的是离散信号,信号的离散化会引起频谱的周期延拓。因此在进行数字计算时,既要保证 $H(\alpha + f)$ 在主值区间内各级局部频谱分离,又需满足相邻周期内的频谱不混叠。由此,要保证 S 变换系数计算的正确性,还需要讨论抽样对 S 变换的影响。

4 条纹非线性和抽样对 S 变换轮廓术的影响

在实际测量系统中,需要考虑数字视频投影仪和成像仪器的非线性效应,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。如果采用数字视频投影系统, γ 取值通常在 1~3 之间^[13]。(6)式可以写成多项式分布形式,考虑 3 阶非线性影响,变形结构光场(保留前 4 项)表示为^[14-15]

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

式中 $g = g(x, y)$, k_1, k_2, k_3 为比例因子。将(7)式代入(1)式,再根据余弦函数和复指数函数之间的转换关系 $\cos(x) = \exp(ix)/2 + \exp(-ix)/2$, 变形结构光场可简化为

$$g'(x, y) = \sum_{n=-3}^{+3} C_n \exp\{in[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)]\}, \quad (8)$$

式中

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

式中 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ 。可见,条纹的频谱分布中包含有零频、正负基频、正负二次谐波频率以及正负三次谐波频率。以变形条纹图的任意一行为例, $g'(x) = \sum_{n=-3}^{+3} C_n \exp\{in[2\pi f_0 x + \varphi(x)]\}$ 当窗口中心滑至于某一位置 τ 处时,考虑到 $a(x), b(x)$ 缓慢变化,在支撑集上可认为 $a(x) = a(\tau), b(x) = b(\tau), \varphi(x)$ 的泰勒级数的一级近似为

$$\varphi(x) \approx \varphi(\tau) + \varphi'(\tau)(x - \tau), \quad (10)$$

将(10)式代入将(8)式,可得在非线性影响下变形条纹的表达式

$$g' = \sum_{n=-3}^{+3} C_n \exp\{in[2\pi f_0 x + \varphi(\tau) + \varphi'(\tau)(x - \tau)]\}. \quad (11)$$

实际上,由 CCD 采集获取并送计算机处理的变形条纹图是离散的,相当于疏状函数 $\text{comb}(x)$ 对 $g'(x)$ 进行抽样。将(11)式抽样并作傅里叶变换,对其在频域内作平移后再代入(5)式可得抽样信号的 S 变换系数:

$$\begin{aligned} S(\tau, f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F} \left[g'(x) \text{comb} \left(\frac{x}{\Delta x} \right) \exp(-i2\pi f x) \right] \exp \left(-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2} \right) \exp(i2\pi \alpha \tau) d\alpha = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-3}^{+3} C_n \exp\{in[\varphi(\tau) - \tau\varphi'(\tau)]\} \delta \left\{ \alpha + f - n \left[f_0 + \frac{\varphi'(\tau)}{2\pi} \right] \right\} \sum_{N=-\infty}^{+\infty} \delta(\alpha - N/\Delta x) \exp \left(-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2} \right) \exp(i2\pi \alpha \tau) d\alpha = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-3}^{+3} \sum_{N=-\infty}^{+\infty} C_n \exp\{in[\varphi(\tau) - \tau\varphi'(\tau)]\} \delta \left\{ \alpha + f - n \left[f_0 + \frac{\varphi'(\tau)}{2\pi} \right] - N/\Delta x \right\} \exp \left(-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2} \right) \exp(i2\pi \alpha \tau) d\alpha = \\ &= \sum_{n=-3}^{+3} \sum_{N=-\infty}^{+\infty} C_n \exp \left\{ -2\pi^2 \left\{ f - n \left[f_0 + \frac{\varphi'(\tau)}{2\pi} \right] \tau - N/\Delta x \right\}^2 / f^2 \right\} \exp \{ -i[2\pi(f - n f_0 - N/\Delta x)\tau - n\varphi(\tau)] \}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中 Δx 表示在 x 方向上的离散抽样间距, $\frac{1}{\Delta x}$ 为 x 方向上的抽样间频率。如果将 $\frac{N}{\Delta x}$ 取为 $m f_0$ (m 为一整数),

(12)式可改写为

$$S(\tau, f) = \sum_{n=-3}^{+3} \sum_{N=-\infty}^{+\infty} C_n \exp \left\{ -2\pi^2 \left\{ f - n \left[f_0 + \frac{\varphi'(\tau)}{2\pi} \right] \tau - Nm f_0 \right\}^2 / f^2 \right\} \times \exp \{ -i[2\pi(f - n f_0 - Nm f_0)\tau - n\varphi(\tau)] \}, \quad (13)$$

(13) 式表明：函数 $\sum_{n=-3}^{+3} \sum_{N=-\infty}^{+\infty} C_n \exp \left\{ -2\pi^2 \left\{ f - n \left[f_0 + \frac{\varphi'(\tau)}{2\pi} \right] \tau \right\}^2 / f^2 \right\} \exp \{ -i[2\pi(f - n f_0)\tau - n\varphi(\tau)] \}$ 以 $m f_0$ 为间隔周期性重复出现。 m 的取值决定了相邻的“频谱岛”是否发生混叠。

当满足抽样条件时,采用一维 S 变换,根据(5)式可知,由于该方法在计算过程中对信号的傅里叶频谱进行了平移,相当于利用了相邻周期的频谱,如图 2(a)所示,此时两“频谱岛”间并未出现频谱混叠现象,可以正确地提取基频分量,重建物体的面形分布;当不满足抽样时,同样采用一维 S 变换方法,对信号的傅里叶谱进行了平移后,由于在任意位置 τ 处,S 变

换系数受到加权滤波器滤出的局部频谱的影响。如果信号在 τ 处出现局部频谱混叠,如图 2(b)所示,基频分量(实线表示)中混入了来自相邻周期的零频分量(虚线表示),导致 S 变换系数出现误差,利用 S 变换“脊”提取出来的相位也将存在误差,最终影响面形恢复。为了获得准确的 S 变换“脊”信息,需要讨论 S 变换的测量范围。

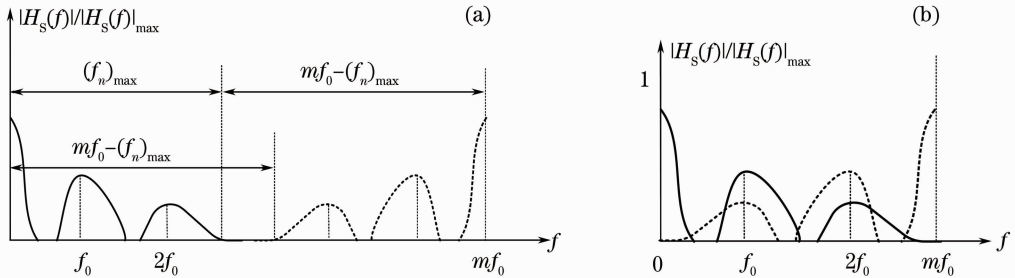


图 2 抽样函数频谱分布示意图。(a)满足抽样条件时的频谱分布;(b)不满足抽样时频谱分布

Fig. 2 Diagram of spectral distribution. (a) Spectral distribution when it is satisfied the sampling condition; (b) spectral distribution when it isn't satisfied the sampling condition

4.1 防止周期内瞬时频谱混叠的条件

位置 τ 处的瞬时频率可表示为^[2]

$$f_m = n f_0 + \frac{n}{2\pi} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=\tau}, \quad (14)$$

n 为谐波的级次。在同一周期内,由于所有谐波中二次谐波分量具有最大权重,因此必须防止它与基频分量发生混叠。此时需要满足的条件为

$$f_0 + \frac{1}{2\pi} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=\tau} < 2f_0 - \frac{2}{2\pi} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=\tau}, \quad (15)$$

即

$$\left| \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=\tau} < \frac{2\pi f_0}{3}, \quad (16)$$

不等式(15)式中,左边表示位置 τ 处的瞬时基频,右边表示该位置处的瞬时二次谐波。

将(3)式代入(16)式可得最后限制条件:

$$\left| \frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \right|_{x=\tau} < \frac{L_0}{3d}, \quad (17)$$

该条件也称 STP 测量系统的结构条件。只有当任意位置处物体瞬时高度变化满足上述条件时,才可以防止周期内瞬时频谱发生混叠。

4.2 防止周期间瞬时频谱混叠的条件

除了保证同一个周期内局部瞬时频谱不发生混叠,为了防止由抽样引起的周期间瞬时频谱发生混叠,还需要保证局部频谱同相邻周期的信息分离。如(13)式所示,当 m 取值足够大时,相邻的“频谱岛”才是分离的;而当 m 取值太小时,不满足奈奎斯特抽样定理时,相邻“频谱岛”会发生混叠,此时局部频谱中混入了来自相邻周期的信号,将无法得到正确的 S 变换系数。

在 STP 测量中,考虑二次谐波频率($n=2$)对测量的影响时,为了防止周期间瞬时频谱出现混叠,抽样必须满足以下条件:

$$f_0 + \frac{1}{2\pi} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=\tau} < m f_0 - \left(2f_0 - \frac{2}{2\pi} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=\tau} \right), \quad (18)$$

即

$$\left| \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=\tau} < \frac{2\pi}{3} (m - 3) f_0, \quad (19)$$

结合同一个周期内的频谱分离条件(16)式和(19)式可得

$$m \geq 4, \quad (20)$$

(20)式表明,在正弦条纹投影时,一个条纹周期至少需要4个抽样值才能保证周期内瞬时频谱不发生混叠。

由此可见,为了保证STP测量的精度,一方面,被测物体的瞬时高度变化必须满足(17)式;另一方面,必须满足抽样条件(20)式。

5 计算机模拟

数字视频投影仪的 γ 取值通常在1.8~2.5之间^[14],再考虑CCD非线性效应的影响。在模拟过程中,非线性因子设置为 $\gamma=2.5$,模拟系统的结构参数 $d/L_0=1$,条纹图尺寸为264 pixel \times 264 pixel。为了模拟与实际测量环境一致,在参考条纹和变形条纹图中同时加入了6%的随机噪声。参考条纹 I_{re} 和变形条纹 I_{dc} 的表达式可分别表示为

$$I_{re} = [0.5 + 0.5\cos(2\pi f_0 x)]^\gamma + N(x, y), \quad (21)$$

$$I_{dc} = \{0.5 + 0.5\cos\{2\pi f_0[x + \tan\theta \cdot Z(x, y)]\}\}^\gamma + N(x, y), \quad (22)$$

式中 $\tan\theta = d/L_0$, $N(x, y)$ 是条纹中的噪声分布,模拟物体 Z 为 $p(x, y)$ 函数,如图3所示。它的具体表达式为

$$p(x, y) = 3 \times (1-x)^2 \exp[-x^2 - (y+1)^2] - 10 \times (x/5 - x^3 - y^5) \exp(-x^2 - y^2) - (1/3) \times \exp[-(x+1)^2 - y^2]. \quad (23)$$

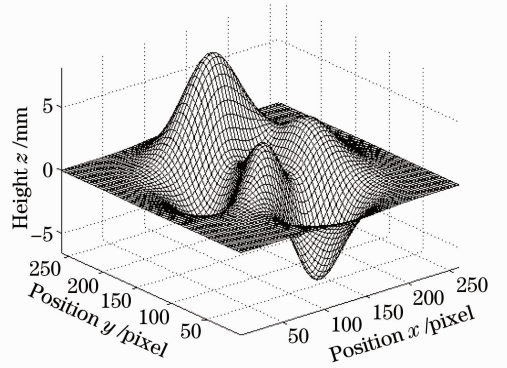


图3 被测物体模拟面形分布

Fig. 3 Simulated surface distribution of the tested object

5.1 周期内的频谱混叠

在满足奈奎斯特抽样条件下($m \geq 4$),通过计算机编程找到变形条纹的最密区间并计算该区间的频谱,再判断该局部频谱的基频部分是否与零频和高次谐波存在混叠。模拟时选择 $m=6$,模拟的被测物体高度分布为 $Z=2p(x, y)$ 。图4(a)是相应的变形条纹图,白色线段表示变形条纹局部最密区域(第202行第86~94列)。图4(b)和图4(c)分别是第202

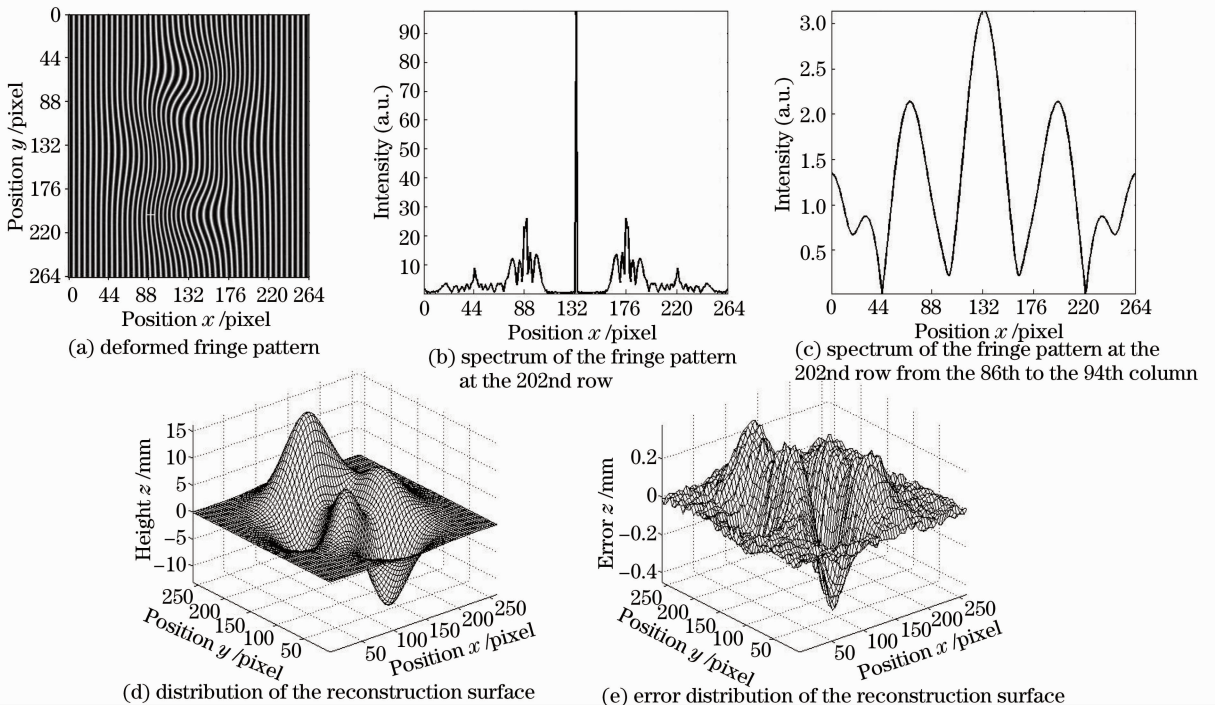


图4 $m=6, Z=2p(x, y)$ 时的模拟结果

Fig. 4 Simulated results when $Z=2p(x, y)$, $m=6$

行傅里叶频谱和该行第 86~94 列的局部频谱。此时,全局频谱出现严重混叠,而局部频谱基本无混叠现象。由 S 变换恢复的被测物体面形分布如图 4(d)所示,对应的误差分布如图 4(e)所示。可见,当任意位置处物体瞬时高度变化满足(17)式时,即周期内瞬时频谱不发生混叠,即使全局频谱出现混叠,利用 S 变换“脊”处理方法也能提取正确的相位信息。

当 $m=6$, 模拟的被测物体高度分布为 $Z=7p(x,y)$ 时。变形条纹图如图 5(a)所示,白色线段

表示变形条纹局部最密区间(第 202 行第 92~100 列)。图 5(b)、(c)分别是第 202 行傅里叶频谱和该行第 92~100 列的局部频谱。此时,全局频谱和局部频谱均发生严重混叠。图 5(d)、(e)为重建物体的高度分布和重建物体的误差分布。当周期内瞬时频谱发生混叠,任意位置处的物体瞬时高度变化不满足(17)式时,将导致 S 变换系数存在误差,利用 S 变换所提取的相位信息将出现错误,无法重建被测物体的三维面形。

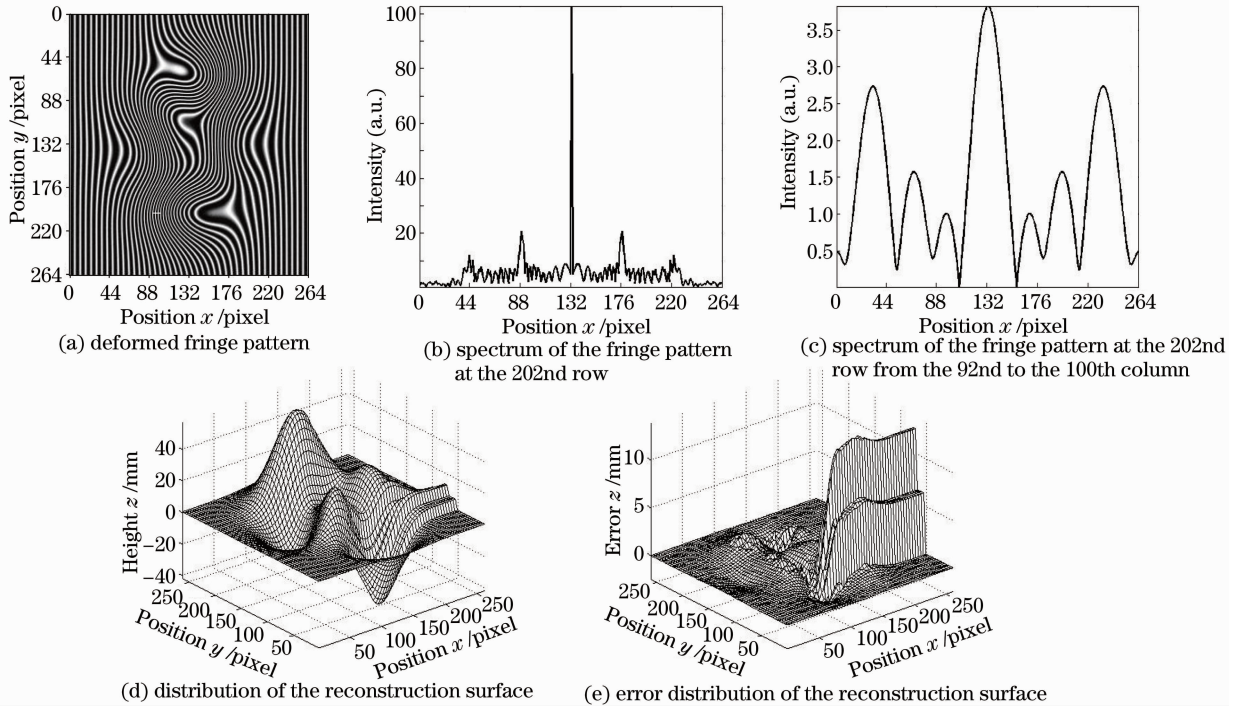


图 5 $m=6, Z=7p(x,y)$ 时的模拟结果

Fig. 5 Simulated results when $Z=7p(x,y), m=6$

5.2 周期内的频谱混叠

由于计算机处理的是离散信号,计算 S 变换系数所用到的信号的傅里叶频谱是周期重复的,只有满足奈奎斯特抽样条件时,各个周期之间频谱才分离。为了模拟抽样对 S 变换的影响,选择变化很小的面形进行处理,即:被测物体高度分布为 $Z=p(x,y)$ 。增加条纹数,使得周期内频谱不混叠,当选择 $m=4$ 时,刚好满足抽样定理。图 6(a)是相应的变形条纹图,白色线段表示变形条纹局部最密区间(第 202 行第 70~78 列)。图 6(b)和图 6(c)分别是第 202 行傅里叶频谱和该行第 70~78 列的局部频谱。可见,第 202 行全局频谱和局部频谱均未出现混叠情况。由 S 变换方法获得的被测物体面形分布以及对应的误差分布分别如图 6(d)和图 6(e)所示。即当满足抽样条件时,利用 S 变换可较准确地

重建被测物体的三维面形。

当不满足抽样条件时,例如: $m=3$,受到同一被测物体调制的变形条纹图如图 7(a)所示,图中白色线段表示变形条纹局部最密区间(第 202 行第 96~104 列)。图 6(b)和图 6(c)分别表示第 202 行傅里叶频谱和该行第 96~104 列的局部频谱。此时得到的重建物体的高度分布和误差分布如图 7(d)、(e)所示。可见,所恢复的面形已经出现了扭曲和失真。

6 实 验

为了验证理论分析,实验选取了一个类似于“米奇”头像作为被测物体,如图 8(a)所示,利用投影仪(型号 CP-HX6500)将正弦条纹分别投影到参考面和被测物体上,由分辨率为 $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 的 CCD(型号 MTV1881EX)采集参考条纹和变形条

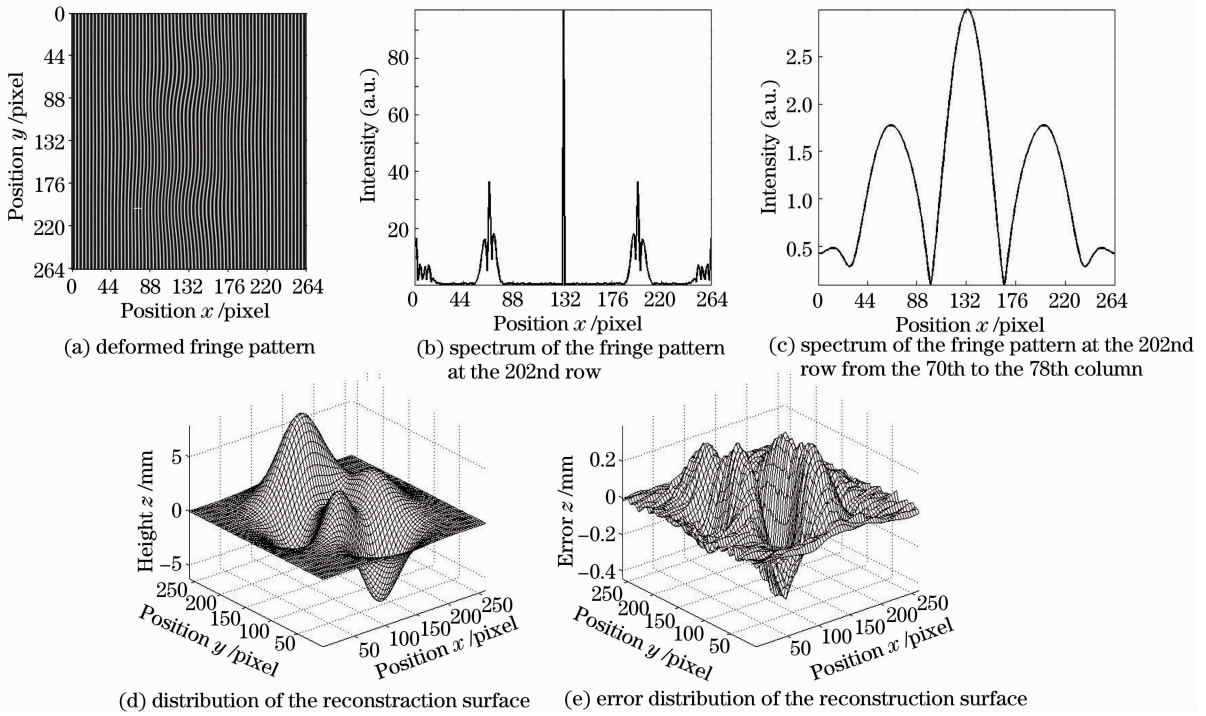


图 6 $m=4, Z=p(x,y)$ 时的模拟结果

Fig. 6 Simulated results when $Z=p(x,y)$, $m=4$

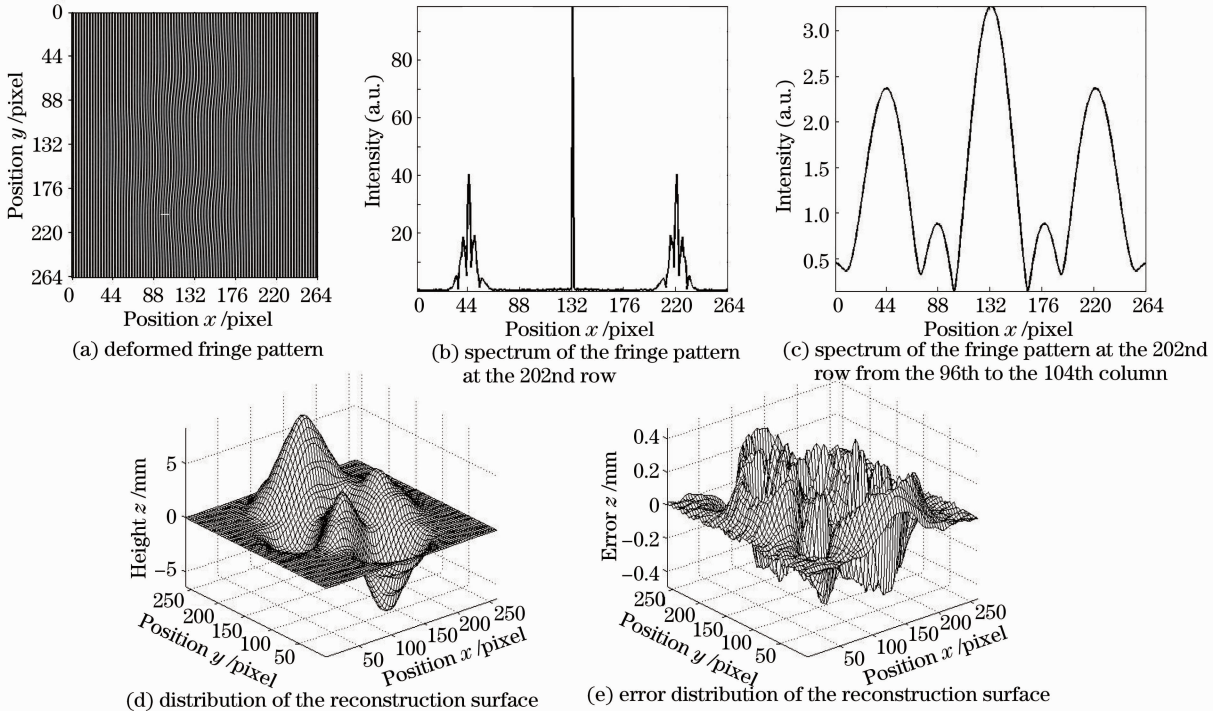


图 7 $m=3, Z=p(x,y)$ 时的模拟结果

Fig. 7 Simulated results when $Z=p(x,y)$, $m=3$

纹,裁剪后用于处理的变形条纹为 $560 \text{ pixel} \times 560 \text{ pixel}$,如图 8(b)所示。

由 CCD 直接拍下的变形条纹图,平均采样点 $m=18$,以像元的间隔为 c 个离散点来获取抽样变形条纹。图 8(c)和图 8(d)分别是选取 $c=3$ 时($m=$

6)变形条纹图(白色线段表示变形条纹局部最密区间第 93 行第 58~66 列)以及 $c=6$ 时($m=3$)变形条纹图(白色线段表示变形条纹局部最密区间第 47 行第 25~33 列),图 8(e)和图 8(f)表示 $m=6$ 时第 93 行的傅里叶频谱和 $m=3$ 时第 47 行的傅里叶频

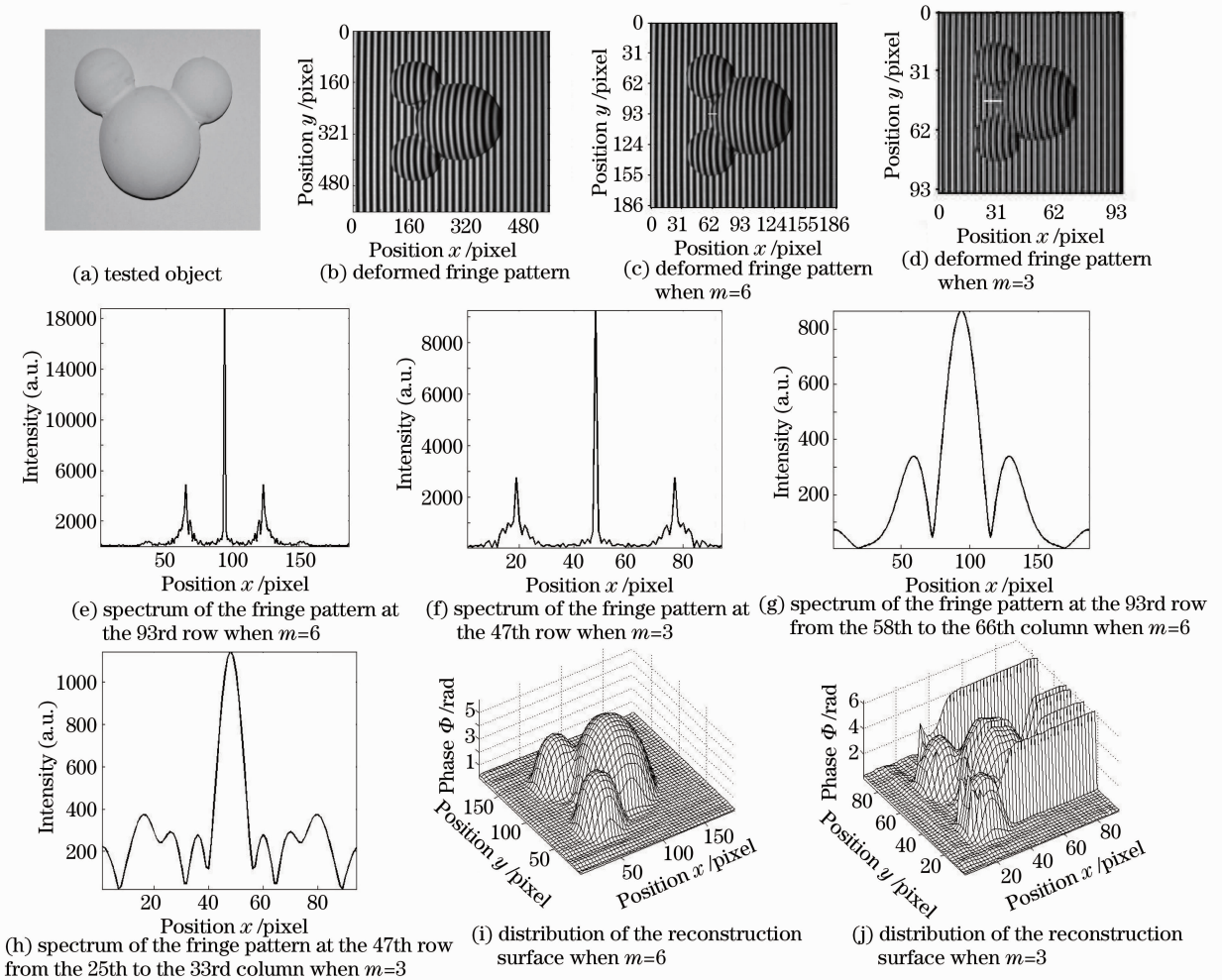


图 8 实验结果

Fig. 8 Experimental results

谱。 $m=6$ 和 $m=3$ 变形条纹图中白色线段所在区间的局部频谱如图 8(g) 和图 8(h) 所示。当满足抽样条件时(即 $m=6$)，第 93 行的全局频谱发生了部分混叠，但局部谱未发生了混叠。此时采用 STP 方法能够比较准确地重建物体的三维面形，如图 8(i) 所示；当抽样不足时(即 $m=3$)，第 47 行的全局频谱和局部频谱均发生了混叠，此时重建的面形如图 8(j) 所示。可见，当不满足抽样条件时，采用 STP 方法所恢复的物体会存在较大的失真。

7 结 论

S 变换采用可以同时进行伸缩和平移的窗函数对变形条纹进行频谱分析和相位提取，这种新型的时频分析方法是短时傅里叶变换和小波变换的推广和延伸，具有更高的相位提取精度。在实际应用中，S 变换处理的是由 CCD 采集的离散化并同时受投影仪和 CCD 非线性影响的条纹图。从离散信号频

域角度分析，推导了受投影仪和 CCD 非线性影响的变形条纹 S 变换的频谱表达式和判断准则。在考虑二次谐波频率对测量的影响下，只有当既无周期内瞬时频谱混叠，也无由抽样引起的周期间瞬时频谱混叠时，S 变换轮廓术才能正确提取变形条纹中的相位信息并由此获得准确的被测物体三维面型。因此，必须选择适当的抽样频率以防止周期内的频谱混叠，提高 STP 测量精度。

参 考 文 献

- 1 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 792-796.
- 2 李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. 光学学报, 2000, 20(6): 792-796.
- 3 M Takeda, K Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. Appl Opt, 1983, 22(24): 3977-3982.
- 4 Xianyu Su, Wenjing Chen. Fourier transform profilometry: a review [J]. Opt & Lasers in Eng, 2001, 35(5): 263-284.
- 5 Qian Kemao, Wang Haixia, Gao Wenjing. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: theoretical analyses [J].

- Appl Opt, 2008, 47(29): 5408—5419.
- 5 Qian Kemao. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis [J]. Appl Opt, 2004, 43(13): 2695—2702.
 - 6 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.
 - 7 Jingang Zhong, Weng Jiawen. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform; wavelet transform profilometry [J]. Appl Opt, 2004, 43(26): 4993—4998.
 - 8 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.
 - 9 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Application of dilating gabor transform to three-dimensional shape analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(6): 725—729.
翁嘉文, 钟金钢. 伸缩窗口傅里叶变换在三维形貌测量中的应用 [J]. 光学学报, 2004, 24(6): 725—729.
 - 10 Zhong Jingang, Weng Jiawen. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform [J]. Opt Lett, 2005, 30(19): 2560—2562.
 - 11 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.
 - 12 Zhong Min, Chen Wenjing, Jiang Mohua. S-transform profilometry eliminates nonlinear error in deformed fringe pattern [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1112003.
钟 敏, 陈文静, 蒋模华. S变换轮廓术中消除条纹非线性影响的方法 [J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1112003.
 - 13 M J Baker, J F Chicharo, J Xi. An investigation into temporal gamma luminance for digital fringe Fourier transform profilometers [C]. IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2007: 1—6.
 - 14 Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital Image Processing (2nd Edtion) [M]. Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi Transl.. Beijing: Science Press, 2007. 63.
Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. 数字图像处理(第二版) [M]. 阮秋琦, 阮宇智译. 北京: 电子工业出版社, 2007. 63.
 - 15 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.

栏目编辑: 张 腾