

文章编号: 1001-3806(2016)06-0801-05

## 基于散斑图像的远程振动频率提取方法研究

石 焕, 朱 弘, 肖 容, 吴 炬, 张秋霞, 钱荣欣

(公安部 第三研究所 特种技术事业部, 上海 201204)

**摘要:** 为了得到远程物体的微米级振动的频率信息, 采用基于散斑图像的远程振动频率提取方法, 以波长为 532nm 连续激光器作为光源照射 50m 远处被测物体表面, 通过高速摄像机记录物体表面反射空间内的散斑图样提取物体的微振动频率。采用激光散斑图像的数据处理方法, 进行了研究分析和实验验证, 利用长焦镜头对远程散斑图像进行适当散焦处理, 然后提取视频散斑图像间互相关系数峰值点与原点之间的矢量大小来获取散斑的变化信息, 同时对一定宽频率范围内的振动频率进行提取。结果表明, 用该方法得到的激光散斑远程微振动频率的提取准确度达 99.22%。该数据结果为激光散斑应用于远程频率振动检测提供了一定的论证依据。

**关键词:** 激光光学; 激光散斑; 振动频率远程探测; 散焦; 互相关系数

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.006

## Research on the technique of vibration frequency remote detection based on speckle pattern

SHI Huan, ZHU Hong, XIAO Rong, WU Ju, ZHANG Qiuxia, QIAN Rongxin

(Special Technology Division, The Third Research Institute, Ministry of Public Security, Shanghai 201204, China)

**Abstract:** In order to obtain the frequency information of remote object's micron vibration, the remote detection technique of micro vibration information bases on laser speckle interferometer was used. The CW laser of 532nm wavelength was used as light source to light the to-be-detected object surface 50m away. A high speed camera was used as speckle image acquisition system. At first, telephoto lens was used to do the appropriate defocus processing of remote speckle image. Then, the changing information of speckle was obtained from the vector size between the peak value of correlation and the origin point. At the same time, the vibration frequency information in a certain wide frequency range was extracted. The results show that, extraction accuracy of remote micro vibration frequency by laser speckle is up to 99.22%. The study can provide some argumentation basis for acoustic vibration based on laser speckle.

**Key words:** laser optics; laser speckle; vibration frequency remote detection; defocus; correlation coefficient

### 引 言

激光散斑作为高相干光的一种固有现象, 是光束干涉的结果<sup>[1]</sup>。单色光照射到光学粗糙表面发生漫反射, 粗糙表面和介质中的散射子可以看作是由不规则分布的大量面元构成, 相干光照射时, 不同的面元对入射相干光的反射或衍射会引起不同的光程差, 反射或散射的光波动在空间相遇时会在散射体附近(或表面)光场中发生干涉现象, 产生普通光见不到的无规则分布的明暗颗粒状斑点图样。这种颗粒状结构斑点就是光通过散射介质和自由空间传播时形成的散

斑<sup>[2]</sup>。由于激光散斑具有全场、非接触、无损等特点, 因此其在远距离微振动探测、微循环血流测量<sup>[3]</sup>、脑血流检测<sup>[4]</sup>、毛细血管血流检测<sup>[5]</sup>以及精密机械表面粗糙度的精确测量<sup>[6-7]</sup>等多种范围内广泛应用。近年来, 激光散斑信息提取围绕着数据处理速度和精度展开, 华中科技大学的 HUANG 等人<sup>[8]</sup>提出利用正方形爬山搜索法散斑进行仿真实验。中国科技大学的 GUO 等人<sup>[9]</sup>提出利用相位分析算法求解激光散斑图像的位移。桂林电子科技大学的 ZHU 等人<sup>[10]</sup>利用灰度共生矩阵方法分析激光散斑含有的物体表面粗糙度特征。这些均在不同程度上提高了散斑图像在检测方面的实用性, 为激光散斑在实际应用中提供了一定的理论和数据依据。

本文中通过长焦镜头对远处散斑图像进行适当的散焦处理, 用摄像机观察散斑图像的时域光强度变化并跟踪它的轨迹记录, 实现轨迹与散斑图像的移动相

基金项目: 公安部技术研究计划资助项目

作者简介: 石 焕(1987-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光应用方面的研究。

E-mail: shihuan2006@126.com

收稿日期: 2015-10-22; 收到修改稿日期: 2015-11-16

关联。利用相邻两帧散斑图像像素进行互相关计算,得到一个互相关系数的2维矩阵,找到该矩阵中的峰值点,并计算该点相对原点的矢量大小,对散斑图像的视频信息进行处理,得到呈一定规律变化的1维序列数据,通过频谱分析得到散斑图像随时间变化的频率信息,从而可得到物体的振动频率。此方法为激光散斑应用于远程频率振动检测提供了一定的论证依据。

## 1 原理与实验系统

### 1.1 理论分析

激光照射到粗糙物体表面,在反射空间产生随机分布的相干光束,形成散斑。通过光学系统对散斑进行成像<sup>[11-12]</sup>,图像中任意点的光强等于所有达到该点光波的波幅代数和。当物体运动时,散斑因光波相位不同产生随之变化的图样<sup>[13]</sup>。对物体微小振动的位移,散斑成像会随物体反射面移动而改变,散斑波动与物体运动保持相关。实验中通过光学成像系统对散斑图样进行适当散焦来传递变化信息。

如图1所示,用 $(x, y)$ 表示横向平面的坐标,轴向由 $z$ 轴表示, $D$ 为激光照射到待测物体表面被照亮的光斑直径大小, $\lambda$ 是激光波长。反射光通过光学镜头被成像到 CCD 上得到散斑图像。物体表面反射光相位的随机性决定了散斑图样振幅和相位的随机性。通常情况下,成像系统是对距离物体表面距离为 $Z_1$ 的散斑进行成像,在这种情况下,散斑的振幅分布 $T_m$ 等于对粗糙物体表面产生的随机相位 $\varphi$ 进行菲涅耳积分<sup>[14]</sup>,其中假设采用了近轴近似法,且在物体被照射的区域内为均匀反射。

$$T_m(x_0, y_0) = \iint \exp[i\phi(x, y)] \exp\left\{\frac{\pi i}{\lambda Z_1} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx dy = A_m(x_0, y_0) \exp[i\varphi(x_0, y_0)] \quad (1)$$

式中, $T_m(x_0, y_0)$ 和 $A_m(x_0, y_0)$ 都是散斑图像的振幅分布, $\phi$ 是采用菲涅耳积分表达式中任意点 $(x, y)$ 的相位, $\varphi$ 是对菲涅耳积分进行整理运算后的散斑点 $(x_0,$

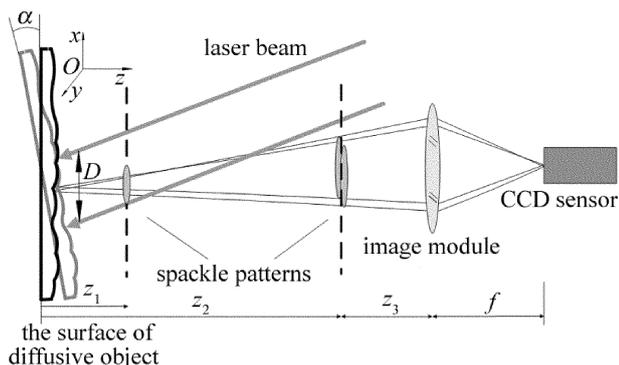


Fig. 1 Schematic description of the system

$y_0)$ 的相位。通过成像装置对光斑进行成像,其图像强度等于:

$$I(x_s, y_s) = \left| \iint T_m(x_0, y_0) h(x_0 - Mx_s, y_0 - My_s) dx_0 dy_0 \right|^2 \quad (2)$$

式中, $h$ 是空间脉冲响应参量, $M$ 是成像系统放大倍数的倒数。 $h$ 与光学图像模糊以及 CCD 像素大小有关,对于散斑点 $(x_0, y_0)$ 成像在 CCD 感光面中像的位置 $(x_s, y_s)$ 处的 $M$ 值计算如下:

$$M = \frac{(Z_2 + Z_3 - Z_1) - f}{f} \quad (3)$$

式中, $f$ 为成像镜头焦距。在远距离探测中,物体与镜头之间的距离远远大于焦距。所以:

$$M \approx \frac{Z_2 + Z_3 - Z_1}{f} \approx \frac{Z_2 + Z_3}{f} \quad (4)$$

对于刚性物体运动,是由横向、轴向及旋转3个方向的运动叠加形成。横向运动中散斑图样的振幅分布 $T_m$ 与物体运动的 $x, y$ 有关。发生微振动的物体,其散斑横向运动经远距离成像后被缩小到几乎不可被探测。对于轴向运动经成像系统成像后基本保持不变。对于旋转运动,其振幅可表示为<sup>[14-15]</sup>:

$$\begin{cases} A_m(x_0, y_0) = \left| \iint \exp[i\phi(x, y)] \exp[i(\beta_x x + \beta_y y)] \times \right. \\ \left. \exp\left\{\frac{\pi i}{\lambda Z_1} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx dy \right| \\ \beta_x = \frac{4\pi \tan \alpha_x}{\lambda} \\ \beta_y = \frac{4\pi \tan \alpha_y}{\lambda} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\beta_x$ 和 $\beta_y$ 分别是散斑图像中 $x$ 方向和 $y$ 方向上的圆频率,角度 $\alpha_x$ 和 $\alpha_y$ 分别表示倾斜运动偏离 $x$ 和 $y$ 方向上的旋转角。由此可知,旋转运动可使光斑发生偏移,可完全改变散斑图样,特别是经成像系统放大散焦后的光斑。

假设加大散焦程度,经过相机捕捉散焦后的图像,此时成像平面由原来的 $Z_1$ 位置变换到 $Z_2$ 位置,即 $Z_1 = Z_2$ ,首先对应的放大系数 $M$ 值将减小(至少减少1个数量级),其次在该平面形成的散斑图样只是经光学镜头成像后在远场的一个近似形式。因此,(1)式和(2)式可近似为:

$$T_m(x_0, y_0) = \iint \exp[i\phi(x, y)] \times \exp\left[\frac{-2\pi i}{\lambda Z_2} (xx_0 + yy_0)\right] dx dy = A_m(x_0, y_0) \exp[i\varphi(x_0, y_0)] \quad (6)$$

$$I(x_s, y_s) = \left| \iint T_m(x_0, y_0) h(x_0 - Mx_s, y_0 - My_s) \right|^2 \quad (7)$$

其中,

$$M = \frac{Z_3 - f}{f} \approx \frac{Z_3}{f} \quad (8)$$

因此,在横向运动情况下,由于横向运动不影响傅里叶变换的幅值,所以散斑图像几乎保持不变;同样由于  $Z_2$  远远大于移动量,故轴向运动也不会影响散斑图像的幅度分布。

(5)式可近似为:

$$\left\{ \begin{aligned} A_m(x_0, y_0) &= \left| \iint \exp[i\phi(x, y)] \exp[i(\beta_x x, \beta_y y)] \times \right. \\ &\quad \left. \exp\left[\frac{-2\pi i}{\lambda Z_1}(xx_0 + yy_0)\right] dx dy \right| \quad (9) \\ \beta_x &= \frac{4\pi \tan \alpha_x}{\lambda} \\ \beta_y &= \frac{4\pi \tan \alpha_y}{\lambda} \end{aligned} \right.$$

由此可知,旋转运动可以用来表示散斑图像的移动。因此,激光散斑经成像系统对散斑图像进行散焦处理,散斑图像只会发生移动而不会发生变化,并且通过散焦处理可以放大散斑图样所携带的物体振动信息,更利于获取散斑图样的振动频率信息,这对散斑变化信息的提取提供了理论依据。

### 1.2 实验装置

实验装备如图 2 所示,由于光斑尺寸的大小影响散斑的对比度<sup>[16]</sup>,散斑的对比度随光斑的尺寸变大而变大,因此本文中通过增大光斑的尺寸来增加散斑视觉。采用波长为 532nm、平均功率为 5W 的连续单横模激光器,激光光束经过准直透镜照射到 50m 远处待测物体表面,经粗糙物体表面反射后形成散斑;使用 10mm ~ 100mm 焦距可变、光圈数 1.8 ~ 2.4 可取的长焦镜头对散斑图样进行成像并做适当散焦放大;使用像素值为 1280 × 1024、像素间距为 6.7 μm × 6.7 μm;最大采样速率为 2480Hz 的高速摄像机 PixeLINK (PL-B741EG 型,加拿大 PixeLINK 公司)对感兴趣的区间图像进行录像;通过图像采集卡(型号为 PL-SW-SDK,加拿大 PixeLINK 公司)将视频信息采集到计算机内,经视频图像分析数据处理方法对视频信息进行处理还原,可得到散斑图像内所记录的被测物体的振动信息。实验中采用的被测物体是由一个可改变输出频率的信号发生器连接到一个小型振动器上,信号发生器频率范围自 10Hz ~ 1MHz 可选,频率精度(1 ± 3%) Hz,输出阻抗 600Ω,小型振动器可将信号发生器的频率信息转化为微振动信息体现出来,其振动幅度为几个微米

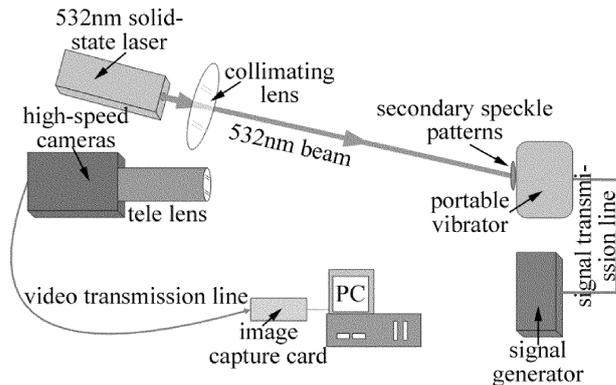


Fig. 2 Experimental device

大小。实验中对采集到的视频信息进行处理并分析,得出相应的频率信息,然后与信号发生器的实际频率进行对比,以此来检验此方法测量振动频率信息的准确性。

### 2 数据分析与处理

在实验环境下,对已知的不同频率的振动信息进行检测,用于对散斑图像远程探测微振动频率可行性的验证以及相关数据处理算法的研究。一般为了减少信息采集的失真,采样频率至少是振动源频率的两倍或以上,为了得到更高准确率的实验结果,选用该摄像机的最大采样频率 2480Hz,通过高速摄像机记录光场中的散斑图样,利用相邻帧相减和插值处理获得像素点内的变化信息,得到散斑图像变化的特征值信息,在计算机中进行相关矢量长度计算和滤波处理,还原振动源频率。实验中选择的振动源频率为 150Hz,采集的感兴趣区域为 16 × 16。图 3 为高速摄像机所拍摄的相邻两帧的散斑图像。

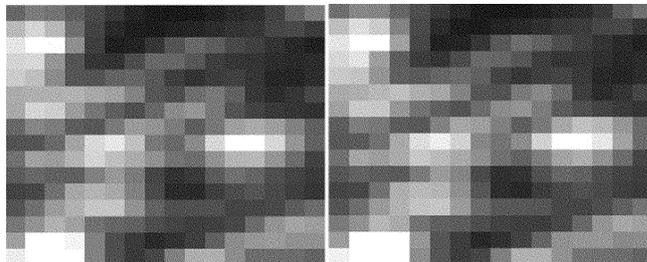


Fig. 3 Two consequential speckle patterns

#### 2.1 散斑图像算法研究

利用 CCD 和图像采集卡得到的是 avi 格式的视频文件,调用程序可以将视频文件逐帧转化为 2 维的矩阵文件,得到 CCD 面阵所在的这一面积上的光强值  $I(i, j)$  ( $i, j = 1, 2, \dots$ )。对相邻两帧中的每一个像素点  $I_k(i, j)$  和  $I_{k+1}(i, j)$  做互相关函数,计算出互相关系数的峰值,记录下该峰值点的位置点,记为  $A(i, j)$ ,以此方法逐帧对视频进行处理,可得到随时间变化的峰值点  $A(i, j, t)$ ,将该点的位置到圆点之间的距离提取出

来作为本算法的特征值,从而还原振动频率信息。图3中的相邻两帧图像的互相关系数图如图4所示,从图中可以看到,两帧图像最大相关系数达0.9935,经过矩阵运算可以得到该最大系数对应的位置为(16,16),其位置矢量大小约为22.48。

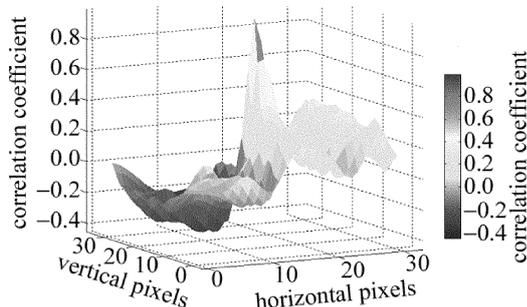


Fig. 4 Correlation between two interfacing images

图5为峰值点位置随着帧数(时间)变化的曲线示意图。从图中可看出,互相关系数峰值点的位置随帧数(时间)的变化是呈周期性的。对该信号进行傅里叶变换,频谱函数  $F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt$ , 其中  $f(t)$  是指峰值点位置对时间变化的曲线函数,  $\omega$  是频率。将其分解成幅值谱,显示与频率对应的幅值大小,如图6所示。从图中可以看出,提取出的频率峰值为151.2Hz。因此该算法还原后的频率与振动源频率150Hz相对误差为0.13%。

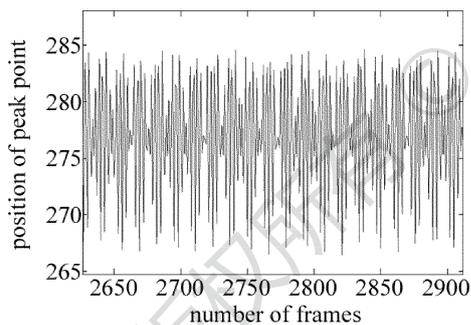


Fig. 5 Extraction of the temporal position of peak point

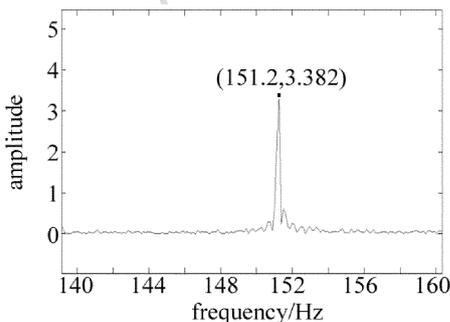


Fig. 6 Spectrum chart

为了排除此提取出的频率信号为伪振动信号,实验中以同样的条件对静止的待测物体进行测量,即关

闭信号发生器,使得小型振动器处于静态,重复以上实验内容得到此时互相关系数峰值点位置信号,如图7所示。

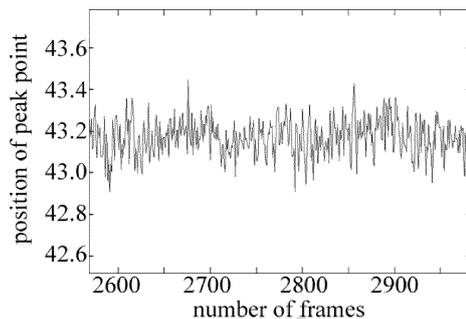


Fig. 7 Signal of the temporal position of peak point for stationary object

从图中可以看出,信号不具有规律性,所提取出的互相关系数峰值点位置随着帧数变化基本是随机分布的。对图7中的信号进行傅里叶变换得到频谱图,如图8所示。

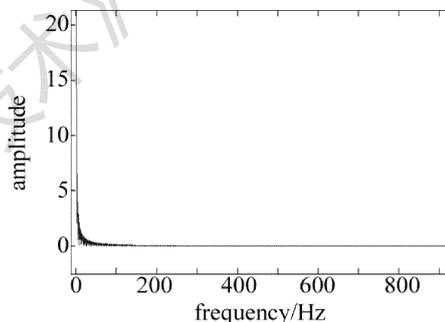


Fig. 8 Spectrum chart for stationary object

如图8所示,结果并没有提取到频率信号。因此可知,图6中所提取出的频率信号不是伪振动信号,而是待测物体表面的振动频率信号。

## 2.2 实验结果分析

实验中采用同样的算法分别对振动源频率为150Hz,200Hz,300Hz,400Hz,500Hz进行视频采集并振动还原,最终得到的结果如表1所示。

Table 1 Compare between calculation results and source datas

vibration frequency/Hz	results/Hz	relative error/%
150	151.2	0.13
200	201.4	0.70
300	298.9	0.37
400	396.2	0.95
500	500.2	0.04

通过对图像还原的数据与原数据进行线性拟合,得到拟合曲线图,如图9所示。拟合曲线函数为  $y = 0.99221x + 1.9957$ ,因此可知,采用激光散探测远程微振动信息具有很强的可行性,其振动频率的还原准确

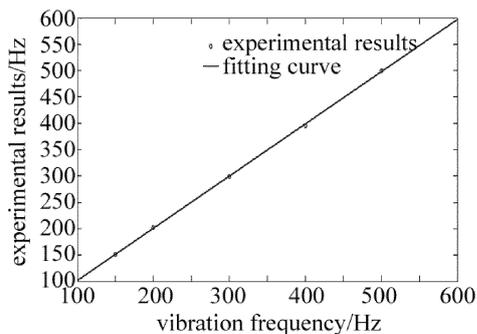


Fig. 9 Fitting curve between the results and the original datas

度可达到 99.22%。

### 3 结 论

以上数据表明,通过对远处散斑图像进行适当散焦处理,以实现散斑图像时域光强度变化的轨迹与散斑图像的移动相关联,利用互相关系数峰值点与原点间的矢量大小对散斑图像进行振动频率提取,最终可实现远程微米级振动的频率提取准确率达 99.22%。通过对多种振动频率的检测结果表明,利用此方法可对远程宽频段范围的微小振动频率进行实时检测,此方法对激光散斑应用到远程频率检测提供了一定的论证基础。

#### 参 考 文 献

- [1] XU M F, GAO W H, SHI Y B, *et al.* Laser speckle suppression due to dynamic multiple scattering scheme introduces by oblique incidence [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6):1716-1721 (in Chinese).
- [2] RIGDEN J D, GORDON E I. The granularity of scattered optical maser light[J]. Proceedings of the IRE, 1962, 50(1):2367-2368.
- [3] KONG P, YANG H, ZHENG G, *et al.* Advances in laser speckle flowgraphy technique[J]. Optical Technique, 2014, 40(1):21-26 (in Chinese).
- [4] ZHANG L, LI P C, NI S L, *et al.* Monitoring changes in cerebral blood flow under the ultra profound hypothe in rats by laser speckle imaging[J]. Acta Biophysica Sinica, 2006, 22(4):303-308 (in Chinese).
- [5] WANG Y, MAZ H, WANG R K. Mapping transverse velocity of particles in capillary vessels by time-varying laser speckle through perturbation analyses[J]. Optics Letters, 2015, 40(9):1896-1899.
- [6] CHEN Ch, GUO X M, MA J, *et al.* Measurement of surface roughness based on laser angular-speckle correlation method [J]. Laser Technology, 2015, 39(4):497-500 (in Chinese).
- [7] CHEN S T, ZHANG Y, HU H F, *et al.* Surface roughness measurement based on fractal dimension of laser speckle [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7):4634-4639 (in Chinese).
- [8] HUANG Z W, ZHU H M. Research on digital speckle correlation method for displacement measurement of rigid body [J]. Computer Measurement and Control, 2004, 12(4):307-309 (in Chinese).
- [9] GUO L, QIU T, WANG M F, *et al.* A new displacement detecting method using digital speckle images [J]. Journal of Circuits and Systems, 2009, 14(2):127-130 (in Chinese).
- [10] ZHU B H, HUANG J, ZHANG W T, *et al.* Analysis of characteristics of laser speckles based on grey level co-occurrence matrix [J]. Laser Technology, 2012, 36(5):620-622 (in Chinese).
- [11] STETSON K A. A review of speckle photography and speckle interferometry [J]. Optical Engineering, 1975, 14(5):482-489.
- [12] BRIERS J D J. Speckle fluctuations as a screening test in the holographic measuring regional blood flow with radioactive microspheres [J]. Journal of Experimental Botany, 1978, 29(1):395-399.
- [13] JIN G C. Computer-aided optical metrology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007:129-133 (in Chinese).
- [14] ZEEV Z, YEVEGENY B. Simultaneous remote extraction of multiple speech sources and heart beats from secondary speckles pattern [J]. Optics Express, 2009, 17(24):21566-21580.
- [15] YEVEGENY B, AVIGAIL D A, YANIV T K, *et al.* A microscope configuration for nanometer 3-D movement monitoring accuracy [J]. Mron, 2011, 42(4):366-375.
- [16] CHANG H, YANG F G, DONG L, *et al.* Effect of structure and size of laser spot on speckle contrast in laser sensing display [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7):4634-4639 (in Chinese).