

文章编号 1004-924X(2011)06-1384-07

双相机相位差异散斑成像技术

王 斌^{1*}, 汪宗洋^{1,2}, 王建立¹, 赵金宇¹, 吴元昊¹, 张世学¹, 董 磊¹, 文 明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:开展了用相位差异散斑技术实现图像采集和图像恢复的实验,在实验室环境下设计了针对扩展目标的相位差异散斑成像双相机实验平台。用两台外触发模式的相机同步采集焦面和指定离焦面上的短曝光图像,用变形镜构造光学系统误差,用强力热吹风机模拟大气湍流。分析了用多台相机与单台相机相比引入的不同问题,给出了多通道之间相面旋转问题的处理方法和多通道之间读出噪声不一致时的相位差异散斑法的目标函数;验证了相位差异散斑法提高图像分辨率的能力。分别用采集到的单帧,3 帧,10 帧图像进行 PDS 运算并分析结果,与基本的相位差异法相比,多帧相位差异散斑成像所恢复的图像质量有很大的提高。

关 键 词:相位差异;散斑成像;波前探测;图像恢复;相位估计

中图分类号:TP391.4;O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1384

Phase-diverse speckle imaging with two cameras

WANG Bin^{1*}, WANG Zong-yang^{1,2}, WANG Jian-li¹, ZHAO Jin-yu¹,
WU Yuan-hao¹, ZHANG Shi-xue¹, DONG Lei¹, WEN Ming¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

** Corresponding author, E-mail: eatingbeen@sohu.com*

Abstract: Image capturing and image restoration implemented by Phase-diverse Speckle(PDS) were researched in this paper. A PDS experimental platform with two cameras was designed for the extended object in our lab. Two cameras were taken to capture the short-expose images in focus and defocus simultaneously and a deformable mirror was used to construct optics system error. Then an electrical dryer was used to simulate the atmosphere turbulence. The problems from the two cameras were compared with that from single camera. Furthermore, the PD destination function was derived when the two cameras have different readout noises and how to solve the image rotation between the multi-channels was given. Finally, the capability of PDS method for image resolution improvement was validated. The PDS processes by single frame, 3 frames and 10 frames were excussed, respectively, and results show that the PDS technique can generate images with highly improved quality compared with

收稿日期:2010-10-12;修订日期:2010-10-29.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA8080603)

the traditional PD method.

Key words: Phase-diverse Speckle(PDS); wave-front aberration; image restoration; phase estimation

1 引言

大气湍流引起的波前相位畸变会随着地基望远镜的口径增大而愈发严重^[1],使其成像质量明显下降。相位差异散斑法(Phase-Diverse Speckle, PDS)正是针对波前相位畸变发展起来的图像复原方法,它综合了相位差异(Phase Diversity, PD)和散斑成像两种事后图像处理方法的优点,既有前者校正畸变的能力,也有后者增加信息量的优势^[2]。PDS 光学系统结构简单清晰,成本低;不仅适用于点源目标,而且也适用于随机扩展目标。除了在图像复原方面有较好的性能,PDS 还可以应用于光学检测领域,能够检测光学系统的像差,装调误差,镜面平整度等参数,为没有合适的平行光管条件下的光学检测,提供了新的思路和方法^[3]。因此 PDS 技术是目前克服波前相位畸变发展的一个重要研究方向。

1979 年 Gonsalves 第一次提出相位差异技术,其方法是在成像系统的焦面和离焦面上同时采集两幅图像,在已知离焦量的前提下解算出波前相位分布并恢复出目标。该方法不但简化了波前探测器光路和复杂度,也使系统能够对扩展目标进行波前探测,摆脱了多数波前探测器对点目标的依赖^[3]。Paxman 等将 PD 理论进一步完善^[4-6],结合散斑成像技术,提出在成像系统的焦面和离焦面上同时采集一对或者多对短曝光图像的相位差异散斑法,并给出了高斯噪声和泊松噪声情况下的数学模型,由此大大提高了 PDS 在噪声情况下的估计精度。Vogel 等利用反演问题相关理论,提出了快速数值解法^[7-8]。LÖfdahl 等已经将 PDS 理论成功地应用于太阳观测领域,获得了高分辨率的太阳表面组织图像^[9-10]。

本文在以上研究的基础上,基于本课题组原有的试验平台^[11],开展了相位差异散斑法的实验研究。用一个吹风机用高速热风对光路加入扰动来模拟大气湍流的影响;用两台外触发模式相机实现了 PDS 双通道的同步采集;分析了用两台相机与单台相机相比引入的不同问题,并给出了多通道之间相面旋转问题的处理方法和多通道之间

读出噪声不一致时的 PDS 的目标函数,实现了相位差异散斑技术的图像采集和图像恢复。恢复后的图像的清晰度随着参与 PDS 运算的帧数增加明显得到提升。验证了 PDS 算法提高图像分辨率的能力,也验证了 PDS 对图像的恢复能力要优于 PD。

2 基本原理

图 1 是 PDS 系统的光路示意图,具有焦面和离焦面两个采集通道,根据实际情况可以增加采集通道的数量。PDS 图像恢复问题可以看作是已知受扰信号的模值求原信号相位的反演问题,也可以看作是一个自适应滤波器。多通道的使用改善了反演问题的病态性,多帧短曝光图像的使用提高了恢复目标的信噪比^[2]。

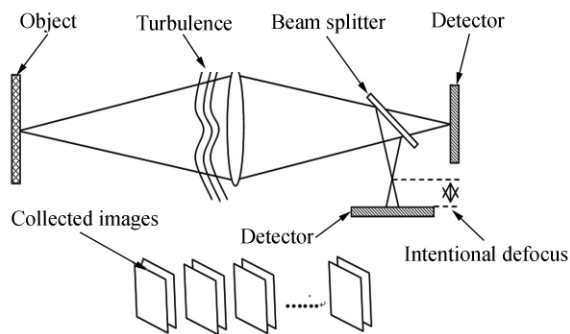


图 1 相位差异散斑法图像采集示意图

Fig. 1 Data-collection scheme for PDS imaging

2.1 成像系统模型

大气和望远镜近似组成线性空间不变系统。在非相干光照明下,高斯噪声模型的成像公式如下^[1]:

$$d(x) = f(x) * s(x) + n(x), \quad (1)$$

式中 d 表示 CCD 上采集到的实际目标图像, f 表示目标的理想图像, s 表示点扩散函数, n 表示高斯噪声, x 表示像面坐标。

近场条件下,点扩散函数表示为^[1]:

$$s(x) = |F^{-1}\{P(v)e^{i\phi(v)}\}|^2, \quad (2)$$

F^{-1} 表示傅里叶逆变换, v 表示光瞳面坐标, P 表示光瞳函数。 ϕ 表示波前相位,可以分解成一组泽尼克多项式的和,

$$\phi(v) = \theta(v) + \sum_{m=4}^M \alpha_m Z_m(v), \quad (3)$$

式中 α_m 表示第 m 项多项式系数, Z_m 表示第 m 项泽尼克多项式基底, θ 表示已知的固定离焦相位。

$$L(f, \{\alpha\}_t) = \frac{1}{2N} \sum_u \left(\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |D_{tc}(u) - FS_{tc}(u)|^2 + \gamma |F(u)|^2 \right), \quad (4)$$

其中, u 表示频域坐标, T 和 C 分别表示使用的帧数和通道数, 如本文是双相机试验, 那么 $T=2$; N 表示单幅图像的像素总数; $\{\alpha\}_t$ 表示需要求解的 t 帧泽尼克系数; F 为傅里叶变换, $D_{tc} = F(d_{tc})$, $F = F(f)$, $S_{tc} = F(s_{tc})$; 等式右边括号内第二项为 Tikhonov 正则项^[7-8], 可以提高算法稳定性和收敛速度, γ 表示非负的正则项系数。

利用最大似然估计理论, 将目标估计作为独立中间过程与相位估计分离, 得到与目标无关的评价函数^[5]。其中, 目标估计式是推导评价函数的中间过程, 具有维纳滤波形式, 可以有效地降低噪声影响。

$$L(\{\alpha\}_t) =$$

$$\frac{1}{2N} \sum_u \left[\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |D_{tc}|^2 - \frac{\left| \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C D_{tc} S_{tc}^* \right|^2}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |S_{tc}|^2} \right], \quad (5)$$

$$F = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C D_{tc} S_{tc}^*}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C |S_{tc}|^2}, \quad (6)$$

评价函数确定后, 图像恢复过程就可以描述为数学最优化问题。本文采用适合大规模变量寻优的简单约束有限内存拟牛顿法 (L-BFGS-B)^[12-13], 编写了基于 C++ 的优化软件平台。经过长期测试验证, 该算法具有较好的收敛效率。

3 实验系统设计

3.1 试验系统组成

此实验系统是在前实验系统^[11]的基础上加入了第二台相机, 与第一台相机用外触发模式来同步采集图像, 而不像前次实验一样要用平移台

2.2 评价函数

PD 的数学模型可以理解为一个自适应滤波器, 在高斯噪声模型下, 目标与多通道图像的均方差可以用作似然函数^[4-6], 在频域表示为:

分时采集, 因为本次实验要验证的是 PD 对大气湍流所引起的相差的矫正, 只有双相机同步采集才可以保证焦面与指定离焦面的图像间的相差只是相差指定的离焦相差。此外, 为了模拟大气湍流的影响, 用一个吹风机用高速热风对光路加入扰动, 这种方法是室内自适应实验的常用方法, 也是本文目前条件仅能做到的。

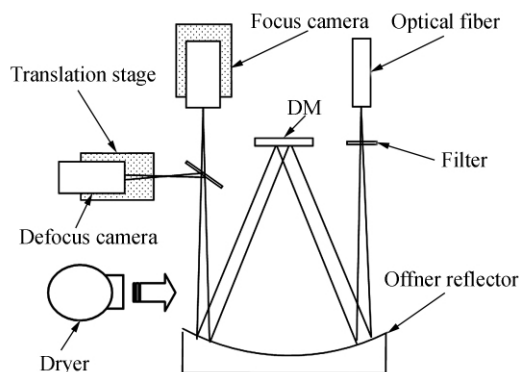
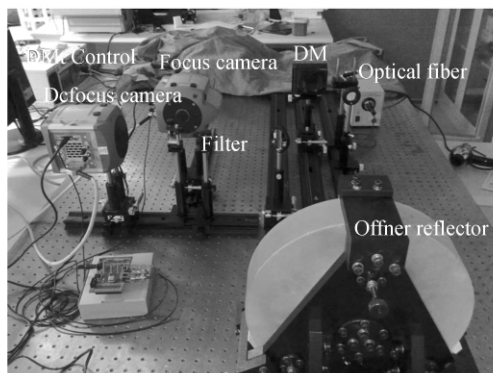


图 2 实验系统结构图

Fig. 2 Structure of experimental system

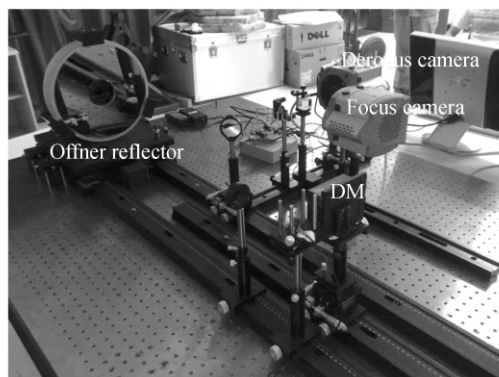
实验系统主要由目标光源、扰动模拟、采集成像 3 个部分组成, 如图 2 所示。实验平台布局如图 3 所示。

光纤光源作为本实验的目标光源, 且与前一次实验用的光纤是同一根; 扰动模拟包括系统相差模拟和大气湍流模拟, 用变形镜来模拟系统相差, 用热吹风机来模拟大气湍流; 采集成像所用的两台相机应为同型号科学级 CCD 相机, 通过外触发模式同步采集在焦和离焦面上的两幅图像。在没有同型号 CCD 的情况下, 至少要保证两台相机的像元大小相等, 再对光源进行窄带滤波以减小不同相机光谱相应曲线不同的影响。在本实验中采用的是两台同 CCD 芯片, 不同型号的两台相机。



(a) 正面

(a) Front face



(b) 侧面

(b) Side face

图3 实验平台布局

Fig. 3 Experimental layout

3.2 试验系统分析

与文献[11]所进行的试验相比,本文引入了第二台相机采集指定离焦量的图像,这同时会带来一些新问题:两台相机的装调问题;两台相机读出噪声不一致的问题。

双相机的装调问题。与单相分时采集不同离焦量的图像相比,双相机 PDS 会引入一个新的装调误差,双相机的相面之间会有一个像旋量。因为任何波前畸变也不会造成像旋,所以很难分析给定角度像旋对波前解算的影响,所以目前只是能在 PD 运算之前对这个误差进行处理,主要通过两步:第一是在装调阶段,通过用遮光板打若干个孔作为目标板,然后根据它们在两个相机上成像的脱靶量微调相机,使相机边缘的相对像旋 <1 pixel;第二步对采集来的图像进行预处理,对离焦图像进行几何旋转并且进行灰度差值变换^[14-15]。因为第一步保证了相对像旋为小角度,

只有在小角度的时候用灰度差值变换才能有较好的精度^[14-15]。

双相机所对应的双通道的读出噪声不一致的问题。参考相关论文[4],并在其推导基础上,把各个通道不同的读出噪声的方差值带入,得到各个通道在读出噪声不一致情况下的目标函数:

$$L(\{\alpha\}_t) =$$

$$\frac{1}{2N} \sum_u \left[\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |D_{tc}|^2 - \frac{\left| \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} D_{tc} S_{tc}^* \right|^2}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |S_{tc}|^2} \right], \quad (7)$$

$$F = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} D_{tc} S_{tc}^*}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |S_{tc}|^2}, \quad (8)$$

其中 σ_c^{-2} 为通道 c 的噪声读出方差的倒数;公式(8)是多通道之间读出噪声不一致时的目标图像的频谱。

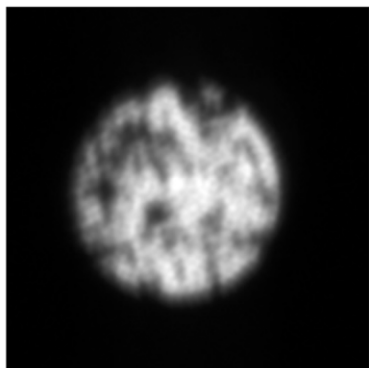
4 实验结果与分析

实验系统焦距为 0.895 m,中心波长为 635 nm,出瞳口径(即变形镜口径)为 0.05 m,焦深约为 0.407 mm。离焦图像应该为 4 倍焦深左右,实验中选取离焦量为 1.6 mm,固定离焦相位 PV 值约为 1 个波长。相机像元尺寸为 $16 \mu\text{m}$,光学系统截止频率约为 72 lp/mm,相机截止频率为 31.25 lp/mm,用吹风机高速热风档对光路加入扰动。光纤光束作为目标,在同一时刻的每一组图像焦面通道图像和离焦面通道图像分别取 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 大小的区域,曝光时间为 20 ms,连续采集。

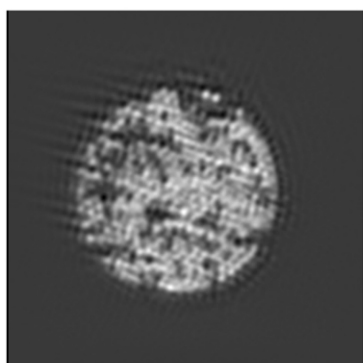
本文分别用采集来的图像中的单帧,3 帧,10 帧进行 PDS 运算,并把图像恢复结果进行对比。因为采用的科学级相机采集的图像是 14 位的,为了转化为 BMP 图像显示,这里只是用了最简单的线性拉伸算法把 14 位的图像中的最小值到最大值映射到了 0 到 255 区间内,除此之外,没有加入任何图像处理,在 PD 的运算过程中用到的还是原始的 14 位图像。

如图 5 所示,图 5(a)为采集来的图像序列中的第一帧的焦面图像。恢复后,即使是单帧恢复的,光纤光束成像分辨率也得到了显著的提高,

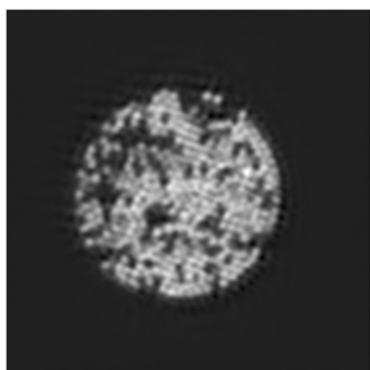
颗粒间轮廓清晰可辨,但是从图 5(b)可以看出,单帧恢复得到的图像有比较严重的重影,也就是波前解算的还是有比较大的误差;从图 5(c)可以看出,用 3 帧恢复得到的图像比单帧恢复的有了进一步的提高,但还是有少量的重影,而图 5(d)所示的用 10 帧恢复的图像重影几乎没有了,也就



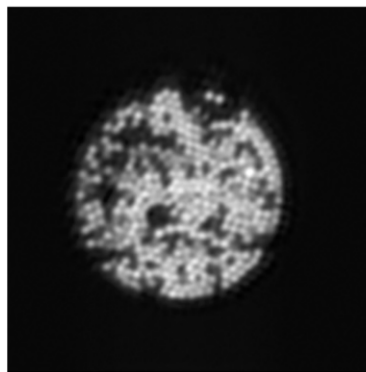
(a) 焦面图像
(a) Focused image



(b) 单帧恢复图像
(b) Recoved image from single frame



(c) 3 帧恢复图像
(c) Recoved image from three frames



(d) 10 帧恢复图像
(d) Recoved image from ten frames

图 5 实验采集的图像及恢复结果
Fig. 5 Original images and results

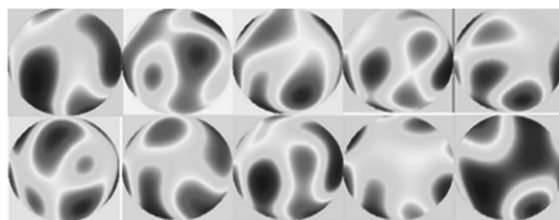


图 6 用 10 帧恢复图像时解算出的波前相位
Fig. 6 Wave-front phases by 10 frame PDSs

是说用 10 帧解算的 10 个波前中的每一个波前误差都要小于对应于该帧的用单帧解算的波前的误差。由此可见,PD 散斑成像在图像恢复上的能力要强于单纯的 PD 算法。图 6 是用连续 10 帧短曝光图像带入 PD 散斑成像系统后所解算出的这 10 帧所对应的波前相位图,它们所对应的恢复的图像是图 5(d)。

5 结 论

本文利用两台外触发模式相机,实现了 PDS 双通道的同步采集;分析了用两台相机与单台相机相比引入的不同问题,并给出了多通道之间相面旋转问题的处理方法和多通道之间读出噪声不一致时的 PDS 的目标函数,实现了相位差异散斑技术的图像采集和图像恢复。恢复后的图像的清晰度,随着参与 PDS 运算的帧数增加明显得到提升,验证了 PDS 算法提高图像分辨率的能力,也验证了 PDS 对图像的恢复能力要优于 PD。因此,该方法是地基大口径光电成像系统较为理想

的图像恢复技术。

本文实现了图像恢复和相位估计,但并未对采集图像进行实时恢复,在今后的工作中,有意将

引入高速并行处理器,希望大幅度提高算法运算能力;本文处理的是在实验室环境下采集来的图像,下一步将处理自然光环境下的景物成像。

参考文献:

- [1] ROGGMANN M C, WELSH B M. *Imaging Through Turbulence*[M]. Washington: CRC Press, 1996.
- [2] SELDIN J H, PAXMAN R G. Phase-diverse speckle reconstruction of solar data[C]. *Image Reconstruction and Restoration, Proc. SPIE*, 1994, 2302:268-280.
- [3] 吴元昊,王斌,赵金宇,等.利用相位差异技术恢复宽带白光图像[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1849-1854.
WU Y H, WANG B, ZHAO J Y, *et al.*. Restoration of broadband white light image using phase diversity technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1849-1854. (in Chinese)
- [4] PAXMAN R G, SCHULZ T J, FIENUP J R. Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1992, A9:1072-1085.
- [5] PAXMAN R G, SELDIN J H, LÖFDAHL M G, *et al.*. Evaluation of phase-diversity techniques for solar-image restoration[J]. *The Astrophysical Journal*, 1996, 466:1087-1099.
- [6] THELEN B J, PAXMAN R G, CARRARA D A, *et al.*. Maximum a posteriori estimation of fixed aberrations, dynamic aberrations, and the object from Phase-diverse Speckle data[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1999, A16:1759-1768.
- [7] VOGEL C R. *Computational Methods for Inverse Problems*[M]. Philadelphia: SIAM Press, 2002.
- [8] VOGEL C R, CHAN T, PLEMMONS R. Fast algorithms for Phase Diversity-Based Blind Deconvolution[C]. *Adaptive Optical System Technologies, Kona, Hawaii, USA. SPIE*, 1998, 3353: 994-1005.
- [9] LÖFDAHL M G, BERGER T E, SHINE R S, *et al.*. Preparation of a dual wavelength sequence of high-resolution solar photospheric images using Phase Diversity[J]. *The Astrophysical Journal*, 1998, 495:965-972.
- [10] LÖFDAHL M G, SCHARMER G B. Wave-front sensing and image restoration from focused and defocused solar images [J]. *Astron. Astrophys.*, 1994, 107:243-264.
- [11] 王建立,汪宗阳,王斌,等.相位差异散斑法图像复原技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1165-1170.
WANG J L, WANG Z Y, WANG B, *et al.*. Image restoration by Phase-diversity Speckle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1165-1170. (in Chinese)
- [12] BYRD R H, LU P, NOCEDAL J, *et al.*. A limited memory algorithm for bound constrained optimization[R]. *Report NAM-08, EECS Department, Northwestern University*, 1994.
- [13] ZHU C, BYRD R H, LU P, *et al.*. LBFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization[R]. *Report NAM-11, EECS Department, Northwestern University*, 1994.
- [14] PARKER J A, KENYON R V, TROXEL D E. Compare of interpolation methods of image resampling[J]. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 1983, MI 22: 31-39.
- [15] UNSER M, ALDROUBI A, EDEN M. Fast B-spline transforms for continuous image representation and interpolation[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intel*, 1991, 13: 277-285.

作者简介:



王 斌(1980—),男,吉林省吉林市人,助理研究员,2003 年于长春光机学院获得学士学位,2006 年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事信息光学、数值分析、数学最优化以及图像处理与恢复等方面的研究。E-mail: eat-
ingbeen@sohu.com



汪宗洋(1986—),男,安徽巢湖人,硕士研究生,2008 年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事大口径光学系统图像恢复和数字图像处理等方面的研究。E-mail: wzy1986@mail.ustc.edu.cn



赵金宇(1976—),男,内蒙通辽人,副研究员,2006 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事地基空间目标探测设备的软件设计、图像处理、电控总体等方面的研究。E-mail: zhaojy@ciomp. ac. cn



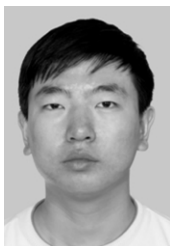
董 磊(1982—),男,山东济宁人,2004 年,2007 年于山东大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为激光物理与技术和傅里叶光学等。E-mail: node-pression@126. com



吴元昊(1977—),男,吉林长春人,助理研究员,2000 年于北京电子科技学院获得学士学位,2008 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事数字图像处理、视频图像跟踪等方面的研究。E-mail: kennth07@163. com



王建立(1977—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp. ac. cn



张世学(1980—),男,吉林长春人,2003 年于吉林大学获得学士学位,2009 年于澳门大学获得博士学位,主要从事计算机科学图形学和数字图像处理等方面的研究。E-mail: zhangsx@mail. ustc. edu. cn



文 明(1980—),男,河北承德人,助理研究员,主要研究方向为空间光学控制理论及应用、空间对地图像信息获取技术和误差理论分析等。E-mail: wenm602@hotmail. com

● 下期预告

纳米颗粒粒径的动态光散射时间相干度测量法

杨 晖,郑 刚,张仁杰

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

针对传统动态光散射纳米颗粒粒径测量法算法复杂、速度慢、成本高等问题,提出了一种利用纳米颗粒动态散射光信号时间相干度的测量法,并对该系统采用的算法和测量系统进行研究。首先,介绍了动态光散射测量法的基本原理,并引出系统相干度的概念(包括时间相干因子和空间相干因子)。接着,从光电探测器的统计特性出发,通过对光子计数方差的分析得到散射光强波动的方差。然后,建立光强波动的方差与时间相干度的方程,并由该方程得到动态光散射信号的衰减线宽。最后,根据 Stokes—Einstein 公式计算出颗粒的粒径。采用粒径为 30,50,100 nm,溶液透光率为 96% 的乳胶球标准颗粒溶液进行了实验,结果表明:动态光散射时间相干度测量法的测量均值误差和重复性误差的平均值分别为 1.84% 和 1.76%,满足国标对均值误差和重复性误差 $<2\%$ 的要求。