

基于全相位谱分析的剪切光束成像目标重构

陈明徕 罗秀娟 张羽 兰富洋 刘辉 曹蓓 夏爱利

Sheared-beam imaging target reconstruction based on all-phase spectrum analysis

Chen Ming-Lai Luo Xiu-Juan Zhang Yu Lan Fu-Yang Liu Hui Cao Bei Xia Ai-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 024203 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.024203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

透射光学系统像平面一阶散射光照度分布规律研究

The research on the illumination distribution law of the first-order scattered light in the focal plane of transmission optical system

物理学报.2017, 66(4): 044201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044201>

部分相干条件下的弱散射样品 ptychography iterative engine 成像

Ptychographic iterative engine with partially coherent illumination for weakly scattering samples

物理学报.2016, 65(18): 184202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.184202>

柱状磁光颗粒的局域表面等离激元共振及尺寸效应

Localized surface plasmon resonance and the size effects of magneto-optic rods

物理学报.2016, 65(11): 114202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.114202>

非相干照明条件下的 ptychographic iterative engine 成像技术

Ptychographic iterative engine with the incoherent illumination

物理学报.2015, 64(24): 244201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244201>

高斯光束在双层云中传输的蒙特卡罗模拟

Transportation of Gaussian light beam in two-layer clouds by Monte Carlo simulation

物理学报.2015, 64(18): 184204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184204>

基于全相位谱分析的剪切光束成像目标重构*

陈明徠† 罗秀娟 张羽 兰富洋 刘辉 曹蓓 夏爱利

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2016年8月1日收到; 2016年10月28日收到修改稿)

剪切光束成像技术是一种非传统散斑成像技术, 能透过扰动介质对远距离目标进行高分辨率成像. 本文提出了一种基于全相位谱分析的图像重构算法, 利用全相位谱分析对回波信号数据进行预处理, 可有效抑制频谱泄露, 校正散斑频谱, 消除多种因素引起的频率漂移误差, 得到准确的散斑强度和相位差, 提高实际成像环境的系统成像能力. 仿真结果表明: 该图像重构算法有效抑制了频率漂移对成像质量的影响, 当信号存在频率误差时, 其成像效果大大优于基于传统傅里叶变换谱分析的重构算法.

关键词: 剪切光束成像, 散斑, 全相位谱分析, 目标重构

PACS: 42.25.Fx, 42.30.Kq, 42.30.Rx

DOI: 10.7498/aps.66.024203

1 引言

剪切光束成像技术^[1,2]是一种新型相干照明主动成像技术, 用三束经频率调制的同源激光以横向剪切方式照射目标, 再利用被测目标返回光束的散斑场进行计算成像, 能克服大气湍流扰动和快速运动目标多普勒频移对成像的影响, 无需自适应光学和成像透镜就能达到衍射极限分辨率. 在探潜、地形地貌观测、天文观测、医学成像以及远程运动目标监视与跟踪等领域有巨大的应用潜力^[3,4].

针对剪切光束成像技术, Hutchin^[5]提出了成像概念和波前恢复的方法, 并阐述了消除大气畸变的机理; Voelz等^[6]用仿真和室内实验对成像原理进行了可行性验证, 用基于Knox-Thompson的指数重建算法重构出了目标图像; 此后, Stahl等^[7]研究了一种新的图像重构算法, 解决了由于缺少目标先验信息很难重构图像的问题; Olson等^[8]对两种波前重构算法进行了比较, 分析了两种方法的优劣, 推动了对原有图像重构算法的分析与改进. 目前, 剪切光束成像技术主要采用“复合指数重建算法”来处理整个散斑场和重构目标图像^[1]. 总之,

上述算法均采用传统傅里叶变换(FFT)谱分析对信号进行处理, 没有考虑回波信号中频率漂移误差对成像质量的影响.

事实上, 目标回波信号的实际频率会受到大气湍流扰动、移频器的移频误差以及目标快速运动等多种因素的影响而出现漂移, 使得解调后的相位数据产生误差, 从而直接影响目标图像的重构质量. 传统FFT谱分析存在谱泄露的缺陷, 严重影响了谱分析的性能^[9], 无法准确提取回波信号的频谱. 而基于全相位FFT (all-phase FFT, apFFT)谱分析^[9-12]的信号处理技术, 具有“相位不变”的良好性质, 具有更优良的抑制谱泄露的性能, 能更好地抑制频率误差对成像质量的影响^[12,13]. 因此, 本文针对剪切光束成像技术, 提出基于全相位谱分析的目标重构算法. 对回波信号进行全相位处理, 提取散斑频谱. 采用最小二乘法推导波前相位的方程, 用高斯-赛德尔法进行迭代计算, 并通过散斑幅值之间的代数运算得到波前幅值. 这种方法不依赖于回波信号拍频的精确估计, 即使频率发生漂移, 也能对目标清晰成像, 有效地抑制了频率漂移对重构图像质量的影响.

* 国家自然科学基金(批准号: 61505248)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shuxuemi@163.com

2 剪切光束主动成像原理

图1为剪切光束成像原理示意图,发射三束具有一定剪切量的“L”形、频率有微小差别的激光照明目标产生三个相同的散斑场,并在探测器阵列表面发生干涉形成拍频信号,最终由探测器阵列接收,实现了将目标的空间频率信息在时域上编码[5,6,14,15]. 利用FFT提取每个探测器单元的回波信号拍频处散斑的振幅和相位差,从而恢复目标整个频谱面,通过傅里叶逆变换可重构目标图像,对多幅图像平均处理,得到目标清晰图像.

由于返回的三个散斑场透过大气湍流时经过相同路径到达探测器阵列,产生相同的相位畸变,散斑场之间的相位差不变,剪切光束成像技术利用双向剪切照明、光瞳面相位差测量和时域信息编码等方法,在技术机理上可最大限度克服大气湍流扰动对成像质量的影响[5].

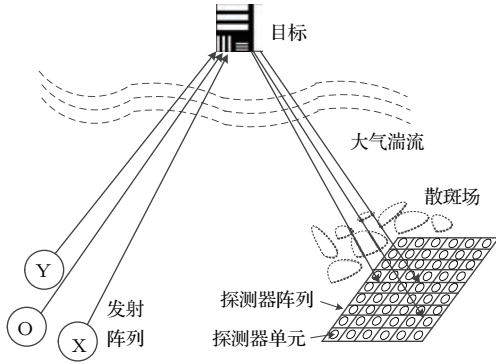


图1 剪切光束成像原理示意图

Fig. 1. Schematic of sheared-beam imaging principle.

根据夫琅禾费衍射原理, O光、X光和Y光照射目标通过漫反射产生的散斑场分别为[6]:

$$\begin{aligned}
 I_0(u, v, t) &= E_0 A_0(u, v) \exp(-j\omega_0 t) \\
 &\quad \times \exp(j\phi(u, v)), \\
 I_1(u, v, t) &= E_1 A_0(u + s_x/(\lambda R), v) \exp(-j\omega_1 t) \\
 &\quad \times \exp(j\phi(u + s_x/(\lambda R), v)), \\
 I_2(u, v, t) &= E_2 A_0(u, v + s_y/(\lambda R)) \exp(-j\omega_2 t) \\
 &\quad \times \exp(j\phi(u, v + s_y/(\lambda R))), \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中 $u = x/(\lambda R)$, $v = y/(\lambda R)$. λ 为激光波长, R 为成像距离, s_x, s_y 分别为O光与X光、Y光之间的剪切量. $E_i, \omega_i (i = 0, 1, 2)$ 分别为O, X, Y光的振幅、角频率. $A_0(u, v)$ 为波前幅值, $\phi(u, v)$ 为波前相位.

三个散斑场在探测器阵列表面发生干涉产生的拍频信号强度分布为

$$\begin{aligned}
 I(x, y, t) &= |I_0 + I_1 + I_2|^2 \\
 &= E_0^2 A_0^2 + E_1^2 A_1^2 + E_2^2 A_2^2 \\
 &\quad + 2E_0 E_1 A_0 A_1 \cos(\Delta\omega_1 t + \Delta\phi_x) \\
 &\quad + 2E_0 E_2 A_0 A_2 \cos(\Delta\omega_2 t + \Delta\phi_y) \\
 &\quad + 2E_1 E_2 A_1 A_2 \cos(\Delta\omega_3 t + \Delta\phi_{xy}), \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned}
 A_0 &= A_0(u, v), \\
 A_1 &= A_0(u + s_x/(\lambda R), v), \\
 A_2 &= A_0(u, v + s_y/(\lambda R)), \\
 \Delta\omega_1 &= \omega_1 - \omega_0, \\
 \Delta\omega_2 &= \omega_2 - \omega_0, \\
 \Delta\omega_3 &= \omega_2 - \omega_1, \\
 \Delta\phi_x &= \phi(u, v) - \phi(u + s_x/(\lambda R), v), \\
 \Delta\phi_y &= \phi(u, v) - \phi(u, v + s_y/(\lambda R)), \\
 \Delta\phi_{xy} &= \phi(u + s_x/(\lambda R), v) - \phi(u, v + s_y/(\lambda R)).
 \end{aligned}$$

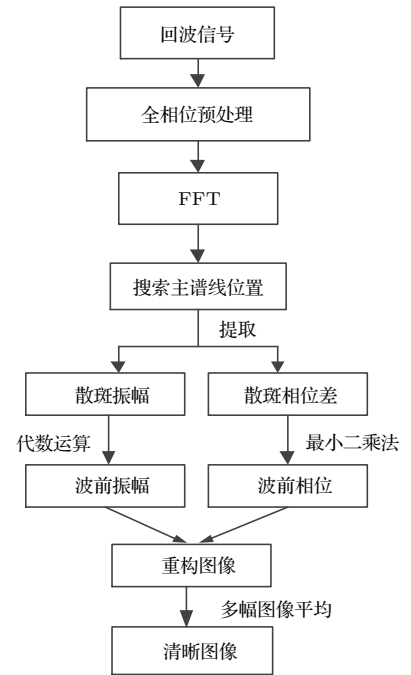


图2 全相位FFT谱分析图像重构算法实现框图

Fig. 2. Schematic diagram of image reconstruction algorithm based on apFFT.

由(2)式可知,波前振幅 $A_0(u,v)$ 和相位 $\phi(u,v)$ 隐含在回波信号 $I(x,y,t)$ 中,以往算法通过传统FFT直接提取.然而,当频率发生漂移时,即频差 $\Delta\omega_i(i=1,2,3)$ 不准确时,使用FFT谱分析方法会发生数据截断效应,引起频谱泄露,提取的波前相位不准确,影响了图像重构质量.本文采用全相位谱分析的目标重构算法解决该问题.

3 基于全相位谱分析的目标重构算法

算法实现框图如图2所示.当回波信号频率存在漂移时,较传统FFT,基于全相位FFT的数据预

处理方法能抑制各频率因数据截断而造成的旁谱泄露,使谱间干扰减小,可准确搜索主谱线位置,精确估计散斑相位差和幅值,从而恢复高质量波前,通过傅里叶逆变换重构目标图像,这种方法有效抑制了频率漂移对重构图像质量的影响.

3.1 全相位数据预处理

对于测量数据为包含 $(2N-1)$ 个元素的数据向量,全相位处理就是完成从长度为 $(2N-1)$ 的数据向量到长度为 N 的数据向量的映射^[9].对于如下数据向量

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0 : & \quad x(0), x(1), \dots, x(N-2), x(N-1) \\ \mathbf{x}_1 : & \quad x(-1), x(0), x(1), \dots, x(N-2) \\ & \vdots \\ \mathbf{x}_{N-1} : & \quad x(-N+1), x(-N+2), \dots, x(-1), x(0) \end{aligned},$$

其预处理过程分为如下步骤:

1) 对上述向量进行如下周期延拓

$$\begin{aligned} & \dots, x(0), x(1), \quad \dots, x(N-2), x(N-1), x(0), x(1), \quad \dots, x(N-2), x(N-1), \dots \\ & \dots, x(0), x(1), \quad \dots, x(N-2), x(-1), \quad x(0), x(1), \quad \dots, x(N-2), x(-1), \quad \dots \\ & \vdots \\ & \dots, x(0), x(-N+1), \dots, x(-2), \quad x(-1), \quad x(0), x(-N+1), \dots, x(-2), \quad x(-1), \quad \dots \end{aligned};$$

2) 对上述周期延拓之后的序列进行竖直方向的求和形成新的周期序列,可得全相位数据向量

$$\mathbf{x}_{ap} = [Nx(0), (N-1)x(1) + x(-N+1), \dots, x(N-1) + (N-1)x(-1)]. \quad (3)$$

假设探测器阵列维数为 $L \times M$,用上述预处理方法,对每个探测器接收到的时域数据进行全相位预处理,得到向量 $\mathbf{x}_{ap}^{ij}(i=1, \dots, L, j=1, \dots, M)$,然后分别进行 N 阶傅里叶变换,可得全相位FFT输出,从而解调出散斑相位差 $\Delta\phi_x^{ij}, \Delta\phi_y^{ij}$ 和幅值^[16].

3.2 波前相位

已知探测器阵列维数为 $L \times M$,则由(2)式可得:

$$\begin{aligned} \phi(x_i, y_j) &= \phi(x_i + s_x, y_j) + \Delta\phi_x^{ij}, \\ i &= 1, 2, \dots, L-1, \\ j &= 1, 2, \dots, M, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi(x_i, y_j) &= \phi(x_i, y_j + s_y) + \Delta\phi_y^{ij}, \\ i &= 1, 2, \dots, L, \\ j &= 1, 2, \dots, M-1. \end{aligned}$$

利用最小二乘法^[17],求解 $\phi(x_i, y_j)$ 的问题可转化为如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=1}^M [\phi(x_i, y_j) - \phi(x_i + s_x, y_j) - \Delta\phi_x^{ij}]^2 \\ & + \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{M-1} [\phi(x_i, y_j) - \phi(x_i, y_j + s_y) - \Delta\phi_y^{ij}]^2. \end{aligned}$$

求上式关于 $\phi(x_i, y_j)$ 的偏导数,并令其等于0,通过整理可得^[18]

$$\begin{aligned}
& \phi(x_i, y_j) \\
&= \frac{1}{4} [\phi(x_i - s_x, y_j) + \phi(x_i + s_x, y_j) \\
&+ \phi(x_i, y_j - s_y) + \phi(x_i, y_j + s_y) \\
&+ \Delta\phi_x^{ij} - \Delta\phi_x^{i-1,j} + \Delta\phi_y^{ij} - \Delta\phi_y^{i,j-1}], \\
&2 \leq i \leq L-1, \quad 2 \leq j \leq M-1, \quad (4)
\end{aligned}$$

根据(4)式, 利用 Gauss-Seidel 数值计算方法可求解相位频谱面。

3.3 波前振幅

由(2)式可知散斑幅值, 并令 $\tilde{E}_0 = E_0^2 A_0^2 + E_1^2 A_1^2 + E_2^2 A_2^2$, $\tilde{E}_1 = 2E_0 E_1 A_0 A_1$, $\tilde{E}_2 = 2E_0 E_2 A_0 A_2$, $\tilde{E}_3 = 2E_1 E_2 A_1 A_2$, 由此可得波前幅值:

$$\begin{aligned}
A_0 = \frac{1}{2E_0} [(\tilde{E}_0 + \tilde{E}_1 + \tilde{E}_2 + \tilde{E}_3)^{\frac{1}{2}} \\
+ (\tilde{E}_0 - \tilde{E}_1 - \tilde{E}_2 + \tilde{E}_3)^{\frac{1}{2}}]. \quad (5)
\end{aligned}$$

因此, 目标频谱为

$$F(u, v) = A_0(u, v) \exp[j\phi(u, v)],$$

再经 FFT 还原目标图像^[19,20]:

$$\begin{aligned}
& f(x', y') \\
&= \iint F(u, v) \exp[j2\pi(ux' + vy')] du dv. \quad (6)
\end{aligned}$$

通过多幅重构图像平均处理, 可得目标清晰图像。

4 仿真实验

设置仿真参数: 激光波长为 532 nm, 三束光之间的频率差分别为 20, 40 和 60 Hz, 采样频率为 1200 Hz, 采样点数为 9600. 剪切量 s_x, s_y 均为 0.1 m, 成像距离为 1000 km, 目标大小为 3.5 m, 接收阵列维数为 80×80 .

当回波信号不存在频率漂移时, 基于 apFFT 谱分析和传统 FFT 谱分析两种重构算法的成像结果如图 3 所示 (10 幅图像平均). 由图可知, 两种算法均能对目标进行成像, 图像质量相同。

移频器的移频误差、大气湍流扰动和运动目标的多普勒效应等因素都会引起频率漂移, 这些误差中, 既有固定误差也有随机误差. 一般漂移误差在最大频差的 5% 以内, 给三束光的频率都设定 0—3 Hz 的随机误差, 为搜索主谱线位置, 利用拍频信号与其他频率信号的幅值差异性搜索主谱线位置. 使用传统 FFT 方法和本文提出的 apFFT 方法分别对图 3 (a) 目标进行五次成像, 其对应的成像结果如图 4 和图 5 所示, 其中图 5 (b)—图 5 (e) 为对 10 幅图像进行平均的结果, 其他图像为没有平均的结果. 可以看出, 传统方法无法抑制频谱漂移误差, 不能重构出目标图像; 而本文方法五次均能对目标成像。

因此, 在回波信号存在频率漂移时, 可采用本文提出的方法有效抑制频率误差对成像的影响. 若想得到更高质量的图像, 可对 50—100 幅图像平均。

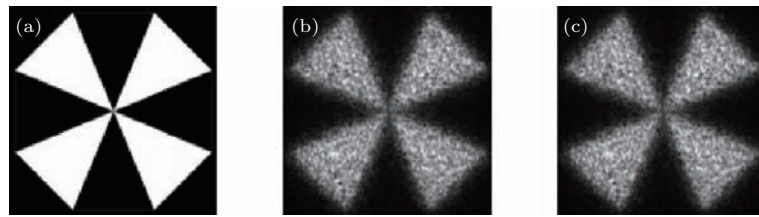


图 3 无频率漂移时目标重构图像 (a) 原始图像; (b) 传统 FFT; (c) apFFT

Fig. 3. The reconstructed images with no frequency error: (a) Original target image; (b) traditional FFT method; (c) apFFT method.

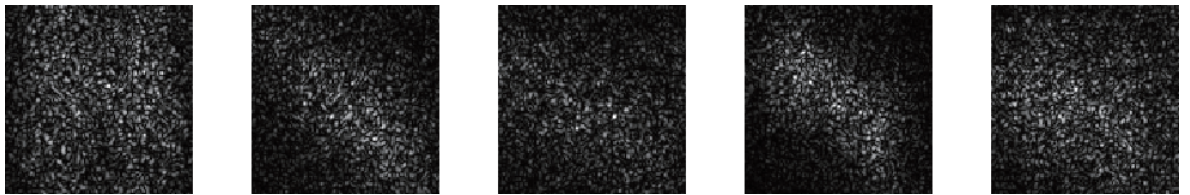


图 4 存在频率漂移时传统 FFT 方法重构图像

Fig. 4. The reconstructed images with frequency error based on traditional FFT method.

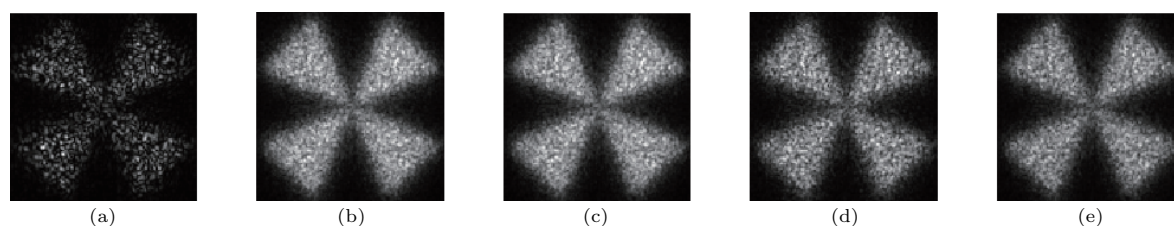


图5 存在频率漂移时 apFFT 方法重构结果 (a) 单幅散斑图; (b)–(e) 平均散斑图

Fig. 5. The reconstructed images with frequency error based on apFFT method: (a) Single speckle image; (b)–(e) average speckle image.

5 结 论

本文提出了一种基于全相位谱分析的剪切光束成像技术目标重构算法, 解决了传统算法无法抑制频率漂移对成像质量的影响问题. 利用全相位谱分析对回波信号进行预处理, 更好地抑制了信号的频谱泄露, 准确地提取散斑相位和幅值. 采用最小二乘算法和高斯-赛德尔法恢复波前相位, 并结合波前相位和幅值对目标图像进行重构, 并对多幅图像平均处理得到清晰图像. 仿真验证了算法的有效性, 较传统FFT谱分析的方法, 有更好的鲁棒性.

参考文献

- [1] Hutchin R A *US Patent* 20120162631 [2012-6-28]
- [2] Hutchin R A *US Patent* 20120292481 [2012-11-22]
- [3] Voelz D G 1996 *Proc. SPIE* **2566** 74
- [4] Voelz D G, Belsher J F, Ulibarri A L, Gamiz V 2002 *Proc. SPIE* **4489** 35
- [5] Hutchin R A 1993 *Proc. SPIE* **2029** 161
- [6] Voelz D G, Gonglewski J D, Idell P S 1993 *Proc. SPIE* **2029** 169
- [7] Stahl S M, Kremer R, Fairchild P, Hughes K, Spivey B 1996 *Proc. SPIE* **2847** 150
- [8] Olson D F, Long S M, Ulibarri L J 2000 *Proc. SPIE* **4091** 323
- [9] Huang X D 2006 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [黄翔东 2006 博士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [10] Huang X D, Wang Z H 2008 *J. Electron. & Inform. Technol.* **30** 293 (in Chinese) [黄翔东, 王兆华 2008 电子与信息学报 **30** 293]
- [11] Huang X D, Wang Z H 2007 *J. Tianjin University* **40** 883 (in Chinese) [黄翔东, 王兆华 2007 天津大学学报 **40** 883]
- [12] Cao B, Luo X J, Chen M L, Zhang Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124205 (in Chinese) [曹蓓, 罗秀娟, 陈明徕, 张羽 2015 物理学报 **64** 124205]
- [13] Chen W, Li Q, Wang Y G 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 3441 (in Chinese) [陈卫, 黎全, 王雁桂 2010 光学学报 **30** 3441]
- [14] Landesman B T, Olson D F 1994 *Proc. SPIE* **2302** 14
- [15] Bush K A, Barnard C C, Voelz D G 1996 *Proc. SPIE* **2828** 362
- [16] Goodman J W 1985 *Statistical Optics* (New York: John Wiley) p495
- [17] Zebker H A, Lu Y 1998 *J. Opt. Soc. Am. A* **15** 586
- [18] Idell P S, Gonglewski J D 1990 *Opt. Lett.* **15** 1309
- [19] Cao B, Luo X J, Si Q D, Zeng Z H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 054204 (in Chinese) [曹蓓, 罗秀娟, 司庆丹, 曾志红 2015 物理学报 **64** 054204]
- [20] Zhang W X, Xiang L B, Kong X X, Li Y, Wu Z, Zhou Z S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164203 (in Chinese) [张文喜, 相里斌, 孔新新, 李扬, 伍洲, 周志盛 2013 物理学报 **62** 164203]

Sheared-beam imaging target reconstruction based on all-phase spectrum analysis*

Chen Ming-Lai[†] Luo Xiu-Juan Zhang Yu Lan Fu-Yang Liu Hui Cao Bei Xia Ai-Li

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 1 August 2016; revised manuscript received 28 October 2016)

Abstract

Sheared-beam imaging technique is considered to be a non-conventional speckle technique for remote imaging through turbulent medium. In this high resolution imaging technique, three beams are splitted from one laser source and illuminate a remote target simultaneously in shearing distribution. Each beam is modulated by a tiny frequency shift so that these beams can interfere and beat together. The returning speckle signals are received by an array of detectors. The primary algorithm for the signal processing and image reconstruction has been developed previously. However, the reconstructed image is deteriorated by the frequency drifting error and spectrum leakage. These frequency errors are always from the transmitter and scattered signals that are caused by spectrum-shift errors from acoustic-optic modulators, atmospheric turbulence, Doppler effects of moving targets, etc. To solve the problems mentioned above, in this paper we propose a new image reconstruction algorithm based on the all-phase spectrum analysis theory. The all-phase fast Fourier transform (FFT) spectrum analysis theory, which can effectively inhibit spectral leakage and correct speckle spectrum, is used to process the scattered signals. By searching for the accurate positions of the beat frequency components in the transformed frequency domain data, the speckle amplitude and phase difference frames can be extracted accurately. Based on the speckle phase-difference frames, the phase distribution of the wavefront is derived by least-square algorithm. The phase distribution in grid is highly coherent, in which each point is related to the phases of its four nearest neighbors. If an initial phase map is given or preset, the phase map of the wavefront can be estimated accurately by Gauss-Seidel method. Meanwhile, the amplitude of wavefront is obtained by the algebraic operation of speckle amplitude frames. The reconstructed wavefront is inverse Fourier transformed to yield a two dimensional image. A series of speckled images of the same object are averaged to reduce the speckle noise. The proposed method improves the ability of system imaging in the actual imaging environment. Simulation experiments validate the effectiveness of the proposed algorithm, and simulation results show that the proposed image reconstruction algorithm can inhibit the frequency errors from influencing imaging quality when there exist frequency errors in scattered signals. Thus, the imaging quality of the algorithm based on the all-phase FFT method is much better than that of the algorithm based on the traditional FFT method. The substantial usage of this technique is widely spread after the reconstruction algorithm has been optimized.

Keywords: sheared-beam imaging, speckle, all-phase spectrum analysis, target reconstruction

PACS: 42.25.Fx, 42.30.Kq, 42.30.Rx

DOI: 10.7498/aps.66.024203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61505248).

† Corresponding author. E-mail: shuxuemlchen@163.com