

剪切光束成像技术对纵深目标的成像

兰富洋 罗秀娟 陈明徠 张羽 刘辉

Sheared-beam imaging of object with depth information

Lan Fu-Yang Luo Xiu-Juan Chen Ming-Lai Zhang Yu Liu Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 204202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.204202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于杂散光抑制要求的光学表面粗糙度控制方法研究

Method of controlling optical surface roughness based on stray light requirements

物理学报.2017, 66(19): 194201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.194201>

矢量基尔霍夫公式经典证明的漏洞与新的严格证明

Flaws in classical proofs of vector Kirchoff integral theorem and its new strict proof

物理学报.2017, 66(16): 164201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164201>

激光陀螺变锁区现象的研究与讨论

Research and discussion on the lock-in threshold variation of ring laser gyro

物理学报.2012, 61(18): 184204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.184204>

两种按比例混合颗粒系的多次散射模拟

Multiple scattering of light by mixtures of two different aerosol types

物理学报.2012, 61(15): 154204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.154204>

反射式单级衍射光栅

Reflection type single-order diffraction grating

物理学报.2012, 61(15): 154203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.154203>

剪切光束成像技术对纵深目标的成像

兰富洋^{1)2)†} 罗秀娟¹⁾ 陈明徕¹⁾ 张羽¹⁾ 刘辉¹⁾

1)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2017年3月3日收到; 2017年5月15日收到修改稿)

剪切光束成像技术是一种能透过大气湍流对远距离目标实现高分辨率成像的主动成像技术. 现有相关研究中所采用的目标均为二维平面目标, 然而现实中的目标一般都具有三维形貌, 目标纵深对回波信号产生的延迟或对成像质量产生不利影响. 从剪切光束成像理论出发, 在二维目标成像模型的基础上建立了三维纵深目标成像模型, 并利用该模型研究了两剪切光与参考光间的频差及目标纵深对成像的影响. 仿真结果表明, 随着拍频的增大, 重构图像质量逐渐下降. 剪切光束成像技术可通过减小拍频来提高真实目标成像质量.

关键词: 剪切光束成像, 散斑成像, 目标纵深, 相位延迟

PACS: 42.25.Fx, 42.30.-d, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.66.204202

1 引言

在空间态势感知、卫星遥感和空天对地观测等远距离成像探测领域, 大气湍流使光传输特性发生随机变化, 这常常会导致成像分辨率下降、像质变差甚至用传统方法无法直接成像等问题^[1,2]. 剪切光束成像 (sheared-beam imaging, SBI) 技术^[3,4] 是一种相干照明主动成像技术, 利用三束激光剪切照射目标, 通过探测器接收被测目标反射回波的散斑场进行计算成像, 不受湍流扰动和快速运动目标多普勒频移的影响^[5-7], 无需自适应光学和成像透镜就能达到衍射极限分辨率^[8], 突破了传统光学成像瓶颈, 具有重要的科学研究意义.

为了验证剪切光束成像技术的可行性及其克服大气湍流成像的能力, 全世界范围内多家研究机构相继开展了理论仿真和实验研究^[9-11], 所采用的目标均为二维平面目标. 考虑到实际应用中目标具有三维形貌, 目标不同纵深区域的成像距离不同, 这将导致不同区域的反射回波到达探测器阵列时, 彼此间存在相位延迟, 对成像质量产生不利影

响. 本文从成像基本原理着手推导了SBI对纵深目标的成像公式, 对目标三维形貌引入的相位延迟情况进行了研究, 结合计算机仿真分析了SBI对纵深目标的成像能力, 最后给出SBI系统在实际应用中拍频设计的依据.

2 原理分析

用激光照射远程目标, 反射回波经远距离传播后到达接收面时发生夫琅禾费衍射. 由于夫琅禾费衍射可近似看作对光场进行的一次傅里叶变换^[12], 探测器接收到的回波光场中包含目标的傅里叶频谱信息^[13]. 若直接利用强度探测器阵列接收目标的傅里叶频谱, 仅能获取强度信息而损失相位信息, 难以据此重构目标图像. SBI基于振幅干涉测量方法, 利用三束以L形式剪切排布、具有不同频差的激光照射目标, 将目标频谱相位信息调制到三束光形成的拍频信号中, 之后对强度探测器阵列采集的反射回波信号进行解调和循环迭代^[14,15], 恢复得到目标频谱相位, 最后进行傅里叶逆变换重构目标图像^[16,17]. 图1为SBI原理示意图.

† 通信作者. E-mail: lanfuyang@opt.cn

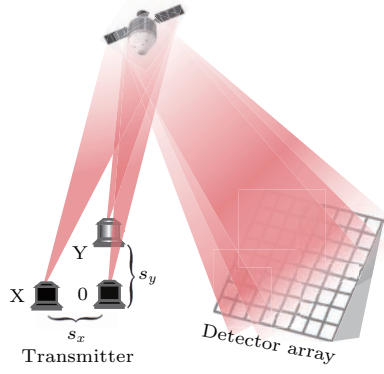


图1 SBI原理示意图

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

探测器阵列平面上反射回波可表示为^[18]

$$\begin{aligned}
 U(x, y) &= E_0 \exp(-j\omega_0 t) \iint O(x', y') \varphi(x', y') \\
 &\times \exp\left(-j2\pi \frac{xx' + yy'}{\lambda R}\right) dx' dy' \\
 &+ E_x \exp(-j\omega_x t) \iint O(x', y') \varphi(x', y') \\
 &\times \exp\left[-j2\pi \frac{(x + s_x)x' + yy'}{\lambda R}\right] dx' dy' \\
 &+ E_y \exp(-j\omega_y t) \iint O(x', y') \varphi(x', y') \\
 &\times \exp\left[-j2\pi \frac{xx' + (y + s_y)y'}{\lambda R}\right] dx' dy', \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中 $U(x, y)$ 为接收平面上的反射回波; t 为时间; (x, y) 为接收平面坐标; (x', y') 为目标平面坐标; $O(x', y')$ 为目标表面反射率分布; $\varphi(x', y')$ 为目标表面粗糙引起的随机相移, 其偏移量在 $[-\pi, \pi]$ 间随机选取^[19]; E_0 和 ω_0 为0光的振幅及角频率; E_x , E_y 和 ω_x , ω_y 分别为X光和Y光的振幅及角频率; s_x 和 s_y 为剪切量; λ 为激光波长; R 为成像距离. (1)式为三束激光反射回波的叠加, 第一项为0光携带的目标频谱, 后两项为X光和Y光携带的目标频谱, $U(x, y)$ 实质上是目标频谱的错位叠加.

对纵深目标成像时, 可将目标看作是由多个具有不同纵深的面元 o_i 构成, 目标基面到接收平面的距离为 R , 不同面元到基面的纵深为 d_i , 如图2所示.

接收平面处的反射回波 $U(x, y)$ 可表示为目标各面元单独产生的反射回波 $U_i(x, y)$ 的相干叠加, 即

$$U(x, y) = \sum_{i=1}^N U_i(x, y)$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{i=1}^N E_0 \exp\left[-j\omega_0 \left(t - \frac{2d_i}{c}\right)\right] \\
 &\times \iint o_i(x', y') \varphi_i(x', y') \\
 &\times \exp\left(-j2\pi \frac{xx' + yy'}{\lambda R}\right) dx' dy' \\
 &+ \sum_{i=1}^N E_x \exp\left[-j\omega_x \left(t - \frac{2d_i}{c}\right)\right] \\
 &\times \iint o_i(x', y') \varphi_i(x', y') \\
 &\times \exp\left[-j2\pi \frac{(x + s_x)x' + yy'}{\lambda R}\right] dx' dy' \\
 &+ \sum_{i=1}^N E_y \exp\left[-j\omega_y \left(t - \frac{2d_i}{c}\right)\right] \\
 &\times \iint o_i(x', y') \varphi_i(x', y') \\
 &\times \exp\left[-j2\pi \frac{xx' + (y + s_y)y'}{\lambda R}\right] dx' dy', \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中 c 为光速; N 为目标面元个数; $o_i(x', y')$ 为各面元的反射率分布; $\varphi_i(x', y')$ 为各面元产生的随机相移.

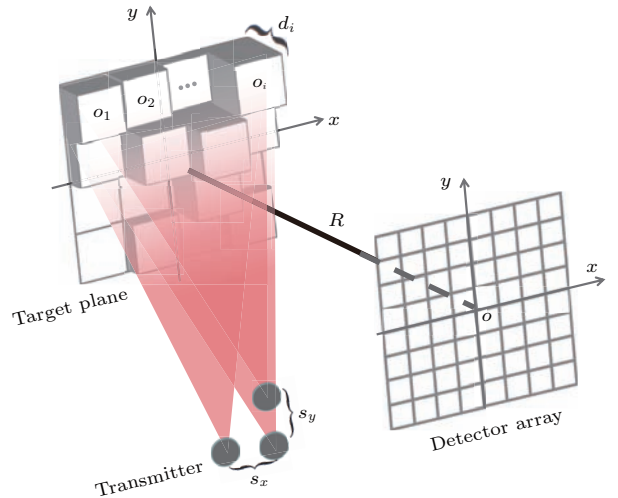


图2 纵深目标成像示意图

Fig. 2. Imaging schematic of object with depth information.

目标纵深对一部分反射回波造成 $2d_i/c$ 的时间延迟, 使得不同纵深表面所产生的反射回波到达接收平面时存在不同相位偏移. 将相位偏移项移入积分式内有

$$\begin{aligned}
 U(x, y) &= E_0 \exp(-j\omega_0 t) \iint O(x', y') \varphi(x', y')
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \exp \left[j\omega_0 \frac{2d(x', y')}{c} \right] \\
 & \times \exp \left(-j2\pi \frac{xx' + yy'}{\lambda R} \right) dx' dy' \\
 & + E_x \exp(-j\omega_x t) \iint O(x', y') \varphi(x', y') \\
 & \times \exp \left[j\omega_x \frac{2d(x', y')}{c} \right] \\
 & \times \exp \left[-j2\pi \frac{(x + s_x)x' + yy'}{\lambda R} \right] dx' dy' \\
 & + E_y \exp(-j\omega_y t) \iint O(x', y') \varphi(x', y') \\
 & \times \exp \left[j\omega_y \frac{2d(x', y')}{c} \right] \\
 & \times \exp \left[-j2\pi \frac{xx' + (y + s_y)y'}{\lambda R} \right] dx' dy', \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中 $d(x', y')$ 为目标纵深分布. 由于 $\varphi(x', y')$ 和 $\exp[j\omega_0 2d(x', y')/c]$ 的乘积仍为 $[-\pi, \pi]$ 区间内的随机相移, 将二者的乘积用 $\varphi'(x', y')$ 表示, (3) 式可写为

$$\begin{aligned}
 U(x, y) &= E_0 \exp(-j\omega_0 t) \iint O(x', y') \varphi'(x', y') \\
 & \times \exp \left(-j2\pi \frac{xx' + yy'}{\lambda R} \right) dx' dy' \\
 & + E_x \exp(-j\omega_x t) \iint O(x', y') \varphi'(x', y') \\
 & \times \exp \left[j\Delta\omega_1 \frac{2d(x', y')}{c} \right] \\
 & \times \exp \left[-j2\pi \frac{(x + s_x)x' + yy'}{\lambda R} \right] dx' dy' \\
 & + E_y \exp(-j\omega_y t) \iint O(x', y') \varphi'(x', y') \\
 & \times \exp \left[j\Delta\omega_2 \frac{2d(x', y')}{c} \right] \\
 & \times \exp \left[-j2\pi \frac{xx' + (y + s_y)y'}{\lambda R} \right] dx' dy', \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中 $\Delta\omega_1 = \omega_x - \omega_0$, $\Delta\omega_2 = \omega_y - \omega_0$ 分别为 X 光、Y 光与 0 光的角频率差. (4) 式后两项频谱的每个复振幅分量都引入了与拍频和纵深有关的相位偏移, 如图 3 所示. 图 3(a) 中每个实线箭头代表目标频谱的一个复振幅分量 (以 3 个为例), 虚线箭头代表相位偏移后的复振幅分量, 各分量叠加之后得到的频谱相位将产生 $\Delta\varphi$ 的偏差, 如图 3(b) 所示. 可见对纵深目标成像时, 探测器阵列接收到的频谱不再是目标的准确频谱, 而是存在一定的误差, 且该误差

随拍频和纵深的增大愈发严重.

SBI 重构的目标图像实为目标表面反射率分布 $O(x', y')$ 与随机相移的乘积, 受随机相移的影响, 单次重构图像中存在较严重的散斑现象 [15]. 为提升成像质量, 通常需要连续进行多次成像, 利用多幅重构图像叠加平均的方法消除图像中的散斑 [20], 如图 4 所示.

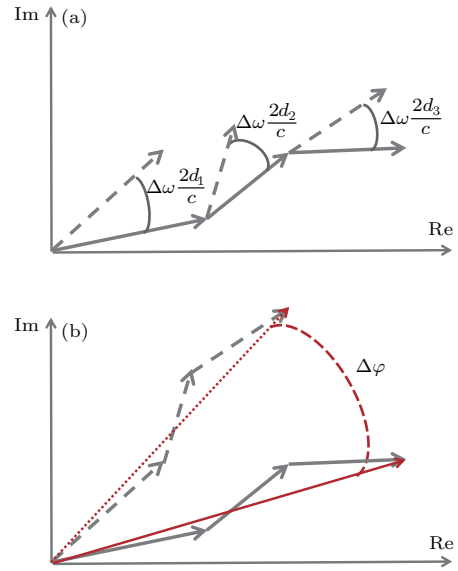


图 3 频谱相位偏移示意图 (a) 理想目标频谱分量和相位偏移后的频谱分量; (b) 频谱分量叠加形成的理想频谱和有误差的频谱

Fig. 3. Schematic of phase shift: (a) Ideal Fourier spectrum components and Fourier spectrum components with their phase shifted; (b) ideal Fourier spectrum and Fourier spectrum with phase-shift errors.

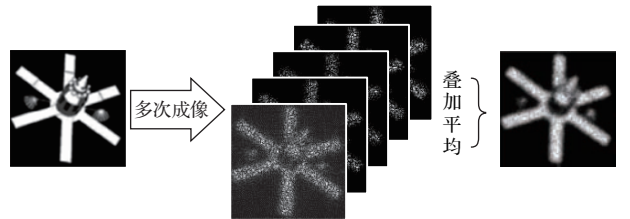


图 4 图像叠加平均去除散斑

Fig. 4. Frame averaging to reduce speckle noise.

3 仿真验证与分析

3.1 拍频对成像结果的影响

SBI 对纵深目标成像时, 拍频和纵深的的作用使得到的目标频谱与真实值产生偏差, 且该偏差随拍频和纵深的增大而增大. 一般空间目标的纵深不超过 10 m [21], 而拍频的取值范围较大, 可从赫兹量

级到兆赫兹量级, 因此拍频的设置对成像结果的影响更为显著. 下面通过仿真分析拍频取值对成像结果的影响.

为对成像质量做出客观描述, 通常采用 Strehl 比来衡量重构图像与目标图像的相似度. 对于两幅图像 $f_a(m, n), f_b(m, n)$, Strehl 比定义为

$$S(f_a, f_b) = \frac{\left[\iint f_a(m, n) \cdot f_b(m, n) dm dn \right]^2}{\iint f_a(m, n)^2 dm dn \times \iint f_b(m, n)^2 dm dn}, \quad (5)$$

式中“ \cdot ”表示内积. 两幅图像越相似, Strehl 比越趋近于 1, 当两图像强度值相等或只相差一个常数因子时 Strehl 比为 1 [22].

选用分辨率为 128 pixel \times 128 pixel 的三种卫星灰度图像作为目标, 激光波长为 1064 nm, X 光和 Y 光相对于 0 光的频差分别为 $\Delta\nu_x$ 和 $\Delta\nu_y$, 成像距离为 3.6×10^4 km, 探测器阵列维数为 80×80 . 为简单起见, 仿真中将目标区域均匀分成两部分, 设定两种不同的纵深, 深度差设为 10 m. 仿真中所有成像结果均为 30 次重构图像的叠加平均. 拍频 $\Delta\nu_x, \Delta\nu_y$ 的取值对成像质量的影响如图 5 所示. 图中 $\Delta\nu_y$ 的取值范围为 5— 10^6 Hz, $\Delta\nu_x$ 的取值范围为 10 — 1.25×10^6 Hz, 不同颜色的曲线具有固定的 $\Delta\nu_y$ 值. 从图 5 可以看出, 当 $\Delta\nu_y$ 取值固定时, 不同目标的重构图像质量均随 $\Delta\nu_x$ 的增加而下降, 该过程中 X 光产生的目标频谱相位误差逐渐增大. 当 $\Delta\nu_y$ 同时增大后, Y 光产生的目标频谱相位误差增加使得成像质量进一步下降, 如图 5 中纵向分布的不同颜色曲线所示, 部分成像结果如图 6 所示. 图 6 中 $\Delta\nu_y$ 固定取值为 2 kHz, $\Delta\nu_x$ 增大后目标细节逐渐变得模糊, 最终无法识别. 仿真结果表明为获得较高质量的图像, 应尽量选用较小的拍频.

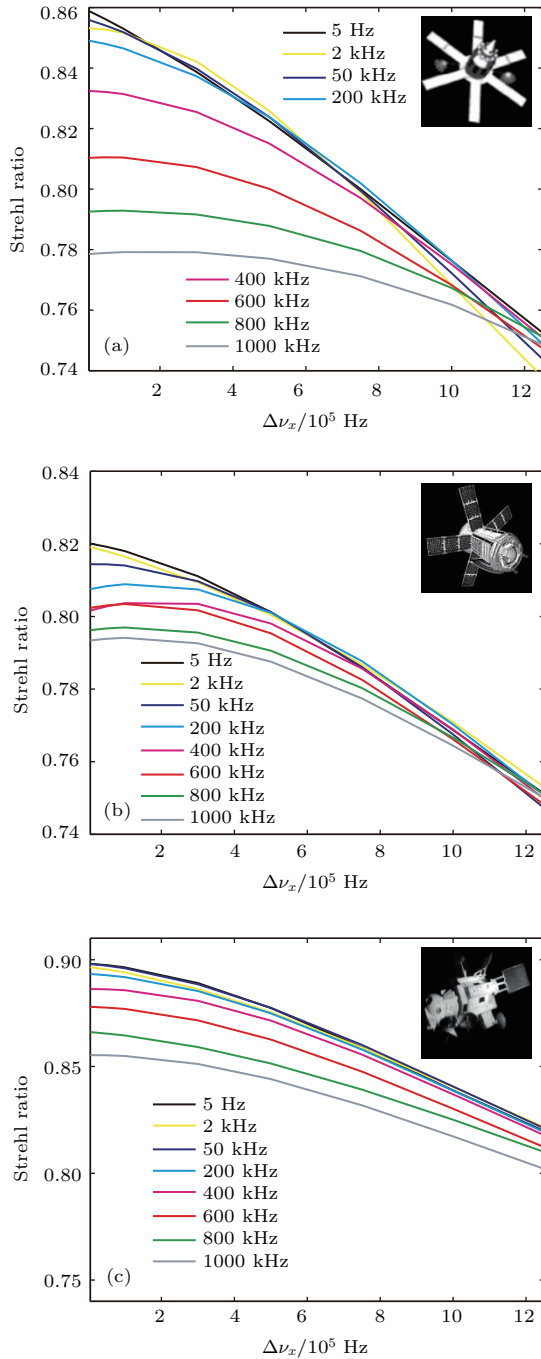


图 5 (网刊彩色) 拍频对重构图像 Strehl 比值的影响
Fig. 5. (color online) Strehl ratios of reconstructed images at different beat frequencies.

3.2 目标纵深分布对成像结果的影响

上述仿真将目标简化为仅有两种深度, 但真实目标一般由多个具有不同深度的面元构成. 为了推广到一般情况, 为同一目标图像赋予不同数目的面元深度, 验证目标纵深分布对成像的影响. 仍选用分辨率为 128 pixel \times 128 pixel 的三种卫星灰度图像作为目标, 依次将目标区域均匀分成 2, 4, 9, 16 个小块, 每小块赋予不同的纵深值, 使小块间深度呈连续梯度变化, 最大纵深为 10 m. 设置两组拍频: 一组取值为 $\Delta\nu_x = 500$ Hz, $\Delta\nu_y = 300$ Hz; 另一组拍频为 $\Delta\nu_x = 500$ kHz, $\Delta\nu_y = 300$ kHz. 其余成像仿真参数与 3.1 节相同, 重构结果如图 7 所示.

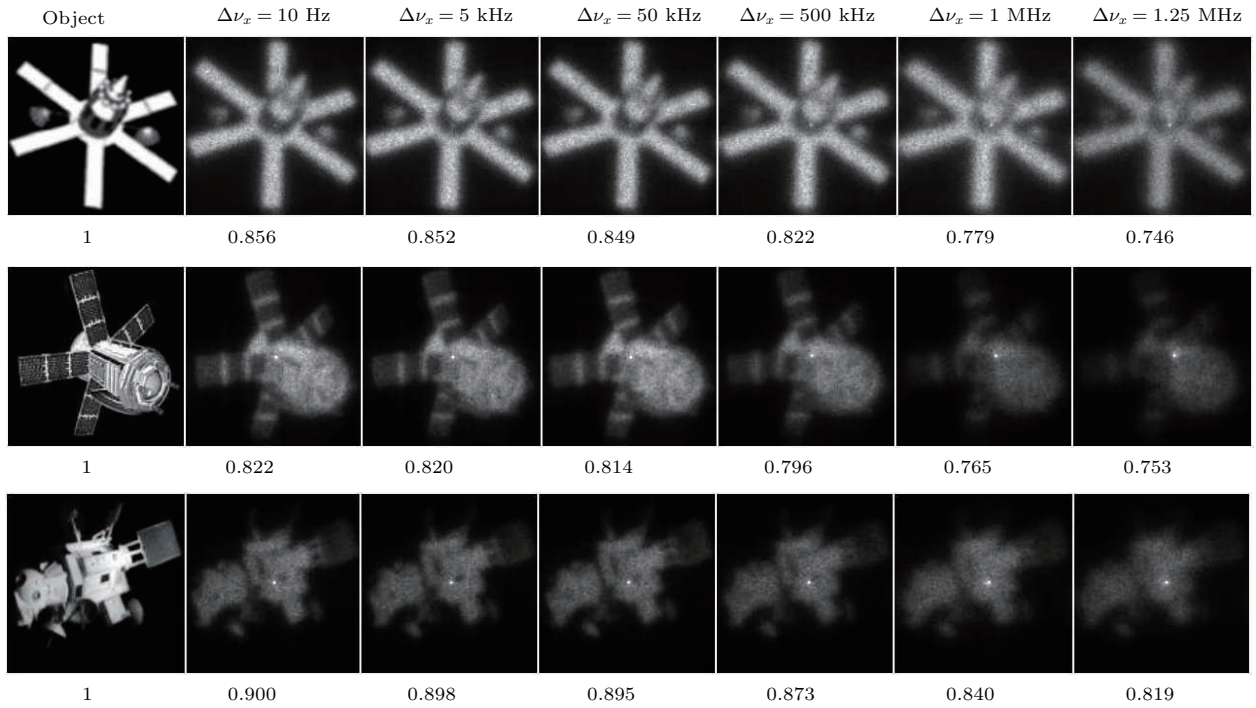


图6 $\Delta\nu_x$ 取不同值时的重构图像及其 Strehl 比值

Fig. 6. Reconstructed target images and corresponding Strehl ratios at different $\Delta\nu_x$ values.

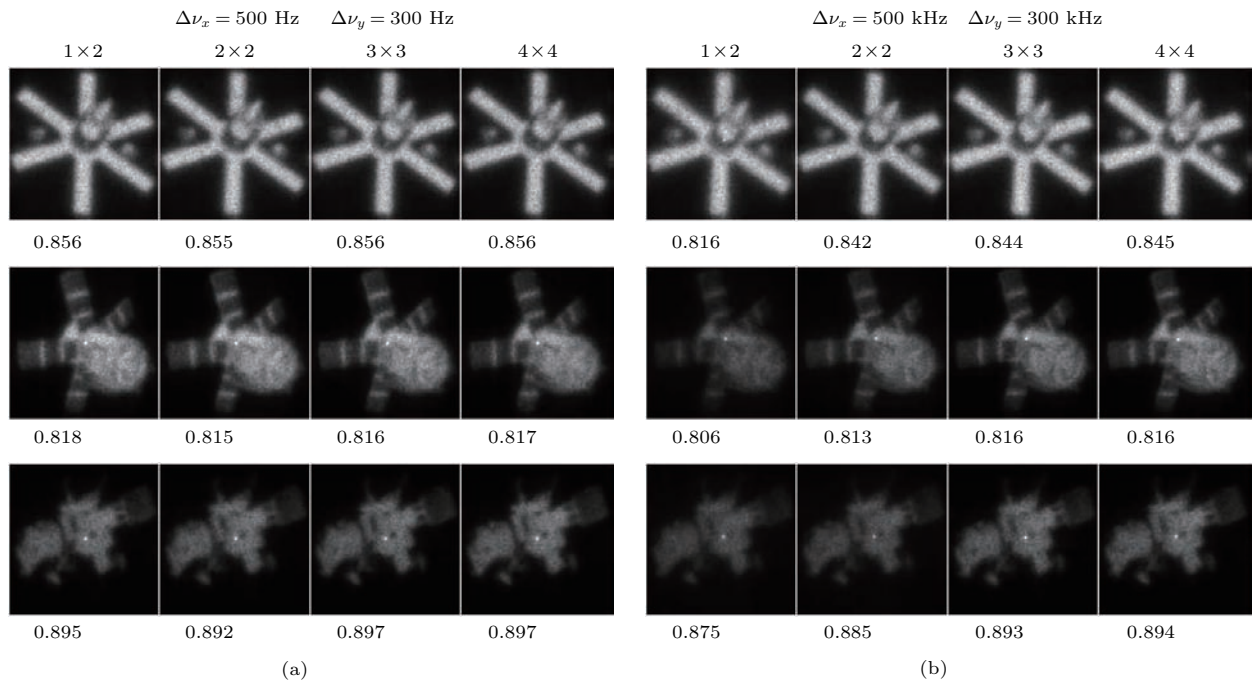


图7 具有不同纵深分布的目标的成像结果 (a) 拍频为 300 和 500 Hz 时目标在不同纵深分布情况下的成像结果; (b) 拍频为 300 和 500 kHz 时目标在不同纵深分布情况下的成像结果

Fig. 7. Reconstructed images of objects with different depth distributions: (a) Imaging results when beat frequencies are 300 and 500 Hz; (b) imaging results when beat frequencies are 300 and 500 kHz.

从图7(a)成像结果看出,当拍频较小时,目标表面的不同纵深分布对成像质量并无明显影响,这是由于此时拍频值远小于光速值,加之目标纵深范围有限,纵深变化对相位偏移量 $2d\Delta\omega/c$ 的影响

十分微弱.但当拍频值较大时,对于最大纵深一定的目标,不同深度面元分块数目越多,重构图像的 Strehl 值越大,如图7(b)所示.根据目标纵深对成像质量影响的原理可知,纵深越大的面元产生的回

波造成的频谱相位偏移量越大, 因此当分块数为2时, 有一半的回波信号存在最大相位偏移^[21], 导致频谱畸变较为严重. 随着不同深度面元分块数目的增多, 目标表面变得平滑, 目标上最大纵深面元所占比例逐渐变小, 偏移量最大的回波对频谱影响的权重也变小, 成像质量提升. 综上可知, 使用SBI技术对纵深目标成像时拍频是影响成像质量的主要因素, 因此为获得质量较好的图像, 应在保证信号能够顺利解调和信噪比较高的前提下尽可能选取较小的拍频.

4 结 论

本文研究了剪切光束成像技术对纵深目标的成像原理, 对成像公式进行了推导和分析, 发现实际目标的反射回波信号间存在大量不同程度的相位偏移, 使获得的目标频谱相位与理想频谱相位间存在偏差, 这些相位偏移主要由激光拍频决定. 理论和仿真结果均表明, 拍频增大会导致成像质量下降. 因此在实际应用中, 为了对复杂纵深目标重构得到质量较好的图像, 需根据探测器的性能, 在信噪比最佳的响应频段内选择尽可能小的拍频. 同时, 拍频设计应避开探测器的低频噪声, 即拍频设计的下限量分析需结合探测器实际参数进行进一步研究与论证.

参考文献

- [1] Li X Y, Gao X, Tang J, Feng L J 2015 *Acta Photon. Sin.* **44** 0611002 (in Chinese) [李希宇, 高昕, 唐嘉, 冯灵洁 2015 光子学报 **44** 0611002]
- [2] Fienup J R 2010 *Imaging Systems Tucson*, Arizona, USA, June 7–8, 2010 IMD2
- [3] Hutchin R A 2012 US Patent 20120162631 [2012-06-28]
- [4] Hutchin R A 2012 US Patent 20120292481 [2012-11-22]
- [5] Bush K A, Barnard C C, Voelz D G 1996 *Proc. SPIE* **2828** 362
- [6] Landesman B T, Kindilien P, Pierson R E 1997 *Opt. Express* **1** 312
- [7] Landesman B T, Olson D F 1994 *Proc. SPIE* **2302** 14
- [8] Voelz D G, Belsher J F, Ulibarri A L, Gamiz V 2002 *Proc. SPIE* **4489** 35
- [9] Voelz D G, Gonglewski J D, Idell P S 1993 *Proc. SPIE* **2029** 169
- [10] Stahl S M, Kremer R, Fairchild P, Hughes K, Spivey B 1996 *Proc. SPIE* **2847** 150
- [11] Optical Physics Company <http://www.opci.com/technologies/speckle-based-imaging> [2017-01-09]
- [12] Goodman J W (Qin K C, Liu P S, Chen J B, Cao Q Z, translated) 2013 *Introduction to Fourier Optics* (3rd Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p54 (in Chinese) [古德曼 (秦克诚, 刘培森, 陈家碧, 曹其智 译) 2013 傅里叶光学导论 (3版) (北京: 电子工业出版社) 第54页]
- [13] Fairchild P, Payne I 2013 *IEEE Aerospace Conference Big Sky* Montana, USA, March 2–9, 2013 p1
- [14] Idell P S, Gonglewski J D 1990 *Opt. Lett.* **15** 1309
- [15] Hutchin R A 1993 *Proc. SPIE* **2029** 161
- [16] 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]
- [17] Chen M L, Luo X J, Zhang Y, Lan F Y, Liu H, Cao B, Xia A L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 024203 (in Chinese) [陈明徕, 罗秀娟, 张羽, 兰富洋, 刘辉, 曹蓓, 夏爱利 2017 物理学报 **66** 024203]
- [18] Crawford T M <http://www.osti.gov/scitech/biblio/666155> [2017-01-09]
- [19] Liu P S 1987 *Fundamentals of Statistical Optics of Speckle* (Beijing: Science Press) p7 (in Chinese) [刘培森 1987 散斑统计光学基础 (北京: 科学出版社) 第7页]
- [20] Corser B A 1996 *M. S. Dissertation* (Lubbock: Texas Tech University)
- [21] Dong L 2014 *Laser & Infrared* **44** 1350 (in Chinese) [董磊 2014 激光与红外 **44** 1350]
- [22] Si Q D, Luo X J, Zeng Z H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104203 (in Chinese) [司庆丹, 罗秀娟, 曾志红 2014 物理学报 **63** 104203]

Sheared-beam imaging of object with depth information

Lan Fu-Yang^{1)2)†} Luo Xiu-Juan¹⁾ Chen Ming-Lai¹⁾ Zhang Yu¹⁾ Liu Hui¹⁾

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

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 3 March 2017; revised manuscript received 15 May 2017)

Abstract

Sheared-beam imaging technique is a non-conventional imaging method which can be used to image remote objects through atmospheric turbulence without needing any adaptive optics. In this imaging technique, the target is coherently illuminated by three laser beams which are laterally sheared at the transmitter plane and arranged into an L shape. In addition, each beam is modulated by a slight frequency shift. The speckle intensity signals scattered from the target are received by a detector array, and then the image of target can be reconstructed by computer algorithm. By far, most of studies in this field have focused on two-dimensional imaging. In real conditions, however, the surface of targets we are concerned about reveals that different depths introduce various phase delays in the scattering signal from target. This delay causes the phase-shift errors to appear between the ideal target Fourier spectrum and the Fourier spectrum received by detector array. Finally, this would result in poor image quality and low resolution. In this study, a three-dimensional target imaging model is established based on the two-dimensional target imaging model. The influence of modulated beat frequency between sheared beam and reference beam is studied on the objects with depth information, and the result shows that large beat frequency may have an adverse effect on reconstructed images. The simulation we have developed for this three-dimensional imaging model uses three targets with different shapes. Each target is divided into several sub-blocks, and we set different depth values (within 10 m) for these blocks. Then beat frequencies are increased from 5 Hz to about 1 MHz, respectively. At each pair of frequencies, the reconstructed image is recorded. Strehl ratio is used as the measure of the imaging quality. Computer simulation results show that the Strehl ratio of reconstructed images descends with the increase of beat frequency, which is fully consistent with the theory of three-dimensional target imaging proposed before. Meanwhile, we find that the depth distribution of target also has an effect on imaging quality. As for actual space targets, the maximum depth is usually not more than 10 m. Compared with the influence caused by beat frequencies, the effect produced by depth distribution is negligible. Therefore when a space target is imaged, beat frequencies play the major role in reconstructing high-quality image. The results presented in this paper indicate that in order to achieve better imaging quality in the practical application, it is necessary to select the smallest beat frequency according to the detector performance and keep the candidate frequencies away from the low-frequency noise of the detector.

Keywords: sheared-beam imaging, speckle imaging, depth of target, phase delay

PACS: 42.25.Fx, 42.30.-d, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.66.204202

† Corresponding author. E-mail: lanfuyang@opt.cn