

剪切光束成像技术稀疏重构算法*

陈明徕^{1)2)3)†} 刘辉¹⁾²⁾³⁾ 张羽¹⁾³⁾ 罗秀娟¹⁾²⁾³⁾马彩文^{1)2)3)‡} 岳泽霖¹⁾²⁾ 赵晶¹⁾²⁾

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)

3) (中国科学院空间精密测量技术重点实验室, 西安 710119)

(2022 年 3 月 18 日收到; 2022 年 6 月 10 日收到修改稿)

在对低轨道运动目标成像时, 剪切光束成像接收系统所需的探测器阵元数目非常庞大, 探测器接收阵列的研制难度大, 成本高. 本文提出剪切光束成像系统空域稀疏采样技术, 同时发射五束激光照射目标携带更多的频谱信息, 研究稀疏重构算法, 在经稀疏采样的回波信号中提取目标的相位差和振幅信息, 通过波前恢复重构目标图像. 理论上, 在不影响分辨率的前提下, 探测器阵列阵元数目可稀疏为传统三光束方法的 1/2, 突破了探测器阵元间距与发射剪切量相等的限制. 仿真结果表明, 与传统三光束方法相比, 所提稀疏重构算法在探测器阵元数目稀疏一倍的情况下, 重构图像质量几乎相同.

关键词: 剪切光束成像, 空域稀疏采样, 稀疏重构算法, 探测器阵列

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

DOI: 10.7498/aps.71.20220494

1 引言

剪切光束成像 (sheared-beam imaging, SBI) 是一种采用激光主动照明和回波相干接收的非传统成像技术, 该技术利用三束频率调制的双向剪切激光束照明目标, 再利用探测器阵列接收从目标表面返回的散斑场的干涉信号进行计算成像, 无需自适应光学和成像透镜就能获得远程目标接近衍射极限的图像^[1–11]. 剪切光束成像技术在远程运动目标监视、天文观测、医学诊断等领域有着重要的研究意义和广阔的应用前景^[1,3].

1993 年, Hutchin^[1] 阐述了剪切光束成像技术消除大气畸变的机理. 同年, 美国空军研究实验室公布了室内实验结果, 证明了该技术具有接近衍射极限成像的能力^[2]. 随后, 研究人员针对性地研究

了大气湍流效应对成像的影响^[12–16]、图像重构算法^[17–20]及接收器阵列测量相位差的方法^[21]. 2015 年, 美国光学科学公司 (Optical Sciences Company, OPC) 与加利福尼亚州立大学合作完成了 1 km 水平激光传输路径外场实验, 证明了剪切光束成像技术在边界层大气湍流中的成像能力^[22]. 2015—2019 年西安光机所在剪切光束成像的图像重构算法优化、像质影响因素及提升方法方面进行了深入研究^[7–10,16,20]. 虽然剪切光束成像技术具备对远距离目标成像的能力^[11], 但是尚存在一些制约 SBI 应用的技术难题.

SBI 系统利用二维离散探测器阵列对回波强度信号实现采样, 探测器阵列空域稀疏是需要攻克的关键技术之一, 根据 SBI 系统的约束条件可知, 探测器阵元间距等于发射光束的剪切量, 在同等成像分辨率要求下, 探测器阵列维数随探测距离的增

* 陕西省自然科学基金研究计划 (批准号: 2020JQ-438) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenminglai@opt.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: cwma@opt.ac.cn

加而增加, 在对低轨道 (LEO) 目标成像时, 其接收阵列的探测器数目达到成千上万. 文献 [13] 在对 1000 km 低轨卫星仿真成像时设计了一些系统参数, 通过接收器孔径尺寸和光束剪切量两个仿真参数可知, 其接收阵列的探测器数目达到 3600—50000 个, 如此庞大的探测器阵列, 其制造成本非常高, 实现难度非常大, 严重制约了 SBI 技术对远程目标成像的应用.

本文提出 SBI 系统空域稀疏采样技术, 同时发射五束激光照射目标, 利用阵元数目稀疏后的探测器阵列接收目标的回波信号, 研究稀疏重构算法解调目标频谱、重构出目标图像, 且不损失成像质量. 经仿真验证, 所提稀疏重构算法在成像质量不变的情况下, 成像系统接收器阵列的阵元数目可稀疏为传统三光束成像系统的 1/2.

2 稀疏采样成像技术

2.1 稀疏采样成像原理

传统三光束成像系统利用具有微小剪切量、在发射平面以“L”形式排布的三束波长相同但有微小频移的激光照射目标, 在目标上产生拍频现象, 用一个探测器阵列接收从目标散射回来的散斑信号, 实现了将目标的空间频率信息在时域上编码. 对采集的回波信号进行解调和迭代求解, 得到目标的调制散斑强度场和相位差信息, 恢复出目标频谱面, 通过傅里叶逆变换重构目标图像, 这是由真实目标到目标傅里叶频谱, 再到目标图像的信息传递过程 [9,23].

传统三光束成像系统要求探测器阵元间距与发射剪切量相等 [9], 增大了远程大面积探测器阵列的成本与研制难度. 为了突破探测器阵元间距与发射剪切量相等的限制, 本文提出 SBI 系统探测器阵列空域稀疏采样技术, 发射五束频率经过调制的相干激光照射目标, 利用空域稀疏后的探测器阵列接收从目标反射回来的散斑信号进行计算成像, 其

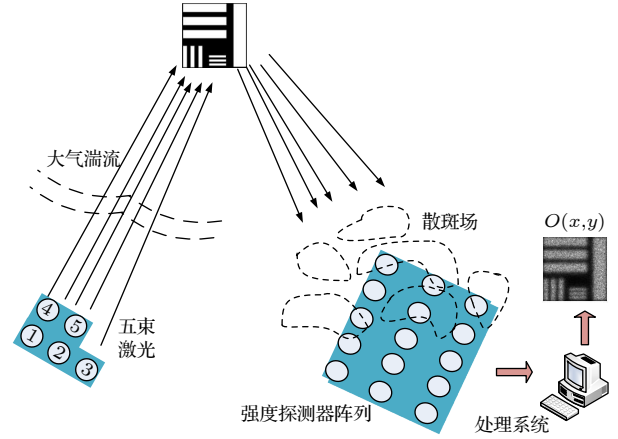


图 1 SBI 技术稀疏采样原理示意图

Fig. 1. Schematic diagram of sparse sampling principle of SBI technique.

成像原理示意图如图 1 所示. 所提方法要求横向探测器阵元间距为发射剪切量的 2 倍, 即 $2s_x$, 与传统三光束成像系统相比, 探测器横向阵元数目可稀疏一倍. 纵向阵元稀疏重构方法与横向阵元稀疏的方法一样, 这里不再推导. 五束光在目标表面任意一点 (x', y') 的光场表达式为

$$U(x', y', t) = \sum_{i=1}^5 E_i \exp[j(k_i r_i - \omega_i t)], \quad (1)$$

式中, 第 1 束激光是主光束, 第 2—5 束激光是参考光束; E_i , ω_i 分别为第 i 束光的振幅、角频率; k_i 是波数; r_i 是激光发射孔径与目标表面的位移矢量, 其标量值分别为

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{R^2 + (x')^2 + (y')^2}, \\ r_2 &= \sqrt{R^2 + (x' - s_x)^2 + (y')^2}, \\ r_3 &= \sqrt{R^2 + (x' - 2s_x)^2 + (y')^2}, \\ r_4 &= \sqrt{R^2 + (x')^2 + (y' - s_y)^2}, \\ r_5 &= \sqrt{R^2 + (x' - s_x)^2 + (y' - s_y)^2}, \end{aligned}$$

其中 R 为成像距离.

因为 $R^2 \gg x'^2 + y'^2$, $R^2 \gg s_x^2 + s_y^2$, 所以

$$\begin{aligned} r_1 &\approx R + (x'^2 + y'^2)/(2R), \quad r_2 \approx R + (x'^2 + y'^2)/(2R) - s_x x'/R, \\ r_3 &\approx R + (x'^2 + y'^2)/(2R) - 2s_x x'/R, \quad r_4 \approx R + (x'^2 + y'^2)/(2R) - s_y y'/R, \\ r_5 &\approx R + (x'^2 + y'^2)/(2R) - s_x x'/R - s_y y'/R. \end{aligned} \quad (2)$$

因此, 五束光在目标平面的叠加可近似为

$$U(x', y', t) = E_1 \exp[j(-\omega_1 t)] + E_2 \exp\{j[-2\pi s_x x' / (\lambda R) - \omega_2 t]\} + E_3 \exp\{j[-4\pi s_x x' / (\lambda R) - \omega_3 t]\} \\ + E_4 \exp\{j[-2\pi s_y y' / (\lambda R) - \omega_4 t]\} + E_5 \exp\{j[-2\pi s_x x' / (\lambda R) - 2\pi s_y y' / (\lambda R) - \omega_5 t]\}. \quad (3)$$

令 $\Gamma(x', y')$ 为目标反射率函数, 根据夫琅禾费衍射原理, 从目标返回的光场为

$$A(x, y, t) = \iint \Gamma(x', y') U(x', y', t) \exp(-j2\pi u x') \exp(-j2\pi v y') dx' dy' \\ = E_1 \exp(-j\omega_1 t) \iint \Gamma(x', y') \exp(-j2\pi u x') \exp(-j2\pi v y') dx' dy' \\ + E_2 \exp(-j\omega_2 t) \iint \Gamma(x', y') \exp\{-j2\pi [u + s_x / (\lambda R)] x'\} \exp(-j2\pi v y') dx' dy' \\ + E_3 \exp(-j\omega_3 t) \iint \Gamma(x', y') \exp\{-j2\pi [u + 2s_x / (\lambda R)] x'\} \exp(-j2\pi v y') dx' dy' \\ + E_4 \exp(-j\omega_4 t) \iint \Gamma(x', y') \exp(-j2\pi u x') \exp\{-j2\pi [v + s_y / (\lambda R)] y'\} dx' dy' \\ + E_5 \exp(-j\omega_5 t) \iint \Gamma(x', y') \exp\{-j2\pi [u + s_x / (\lambda R)] x'\} \exp\{-j2\pi [v + s_y / (\lambda R)] y'\} dx' dy', \quad (4)$$

式中, $u = x / (\lambda R)$, $v = y / (\lambda R)$.

为了方便, 对五束光携带的目标傅里叶频谱进行简化表示:

$$\iint \Gamma(x', y') \exp(-j2\pi u x') \exp(-j2\pi v y') dx' dy' = A_0(u, v) \exp(j\phi(u, v)), \\ \iint \Gamma(x', y') \exp\{-j2\pi [u + s_x / (\lambda R)] x'\} \exp(-j2\pi v y') dx' dy' = A_0(u + s_x / (\lambda R), v) \exp[j\phi(u + s_x / (\lambda R), v)], \\ \iint \Gamma(x', y') \exp\{-j2\pi [u + 2s_x / (\lambda R)] x'\} \exp(-j2\pi v y') dx' dy' = A_0(u + 2s_x / (\lambda R), v) \exp[j\phi(u + 2s_x / (\lambda R), v)], \\ \iint \Gamma(x', y') \exp(-j2\pi u x') \exp\{-j2\pi [v + s_y / (\lambda R)] y'\} dx' dy' = A_0(u, v + s_y / (\lambda R)) \exp[j\phi(u, v + s_y / (\lambda R))], \\ \iint \Gamma(x', y') \exp\{-j2\pi [u + s_x / (\lambda R)] x'\} \exp\{-j2\pi [v + s_y / (\lambda R)] y'\} dx' dy' \\ = A_0[u + s_x / (\lambda R), v + s_y / (\lambda R)] \exp[j\phi(u + s_x / (\lambda R), v + s_y / (\lambda R))], \quad (5)$$

式中, $A_0(u, v)$ 为波前幅值, $\phi(u, v)$ 为波前相位, $A_0(u, v) \exp(j\phi(u, v))$ 为目标傅里叶频谱.

散斑场发生干涉产生的拍频信号强度分布为

$$I(x, y, t) = |A(x, y, t)|^2 = \sum_{i=1}^5 E_i^2 A_i^2 + 2 \sum_{i=1}^4 \sum_{j>i}^5 E_i E_j A_i A_j \cos(\Delta\omega_{ij} t + \Delta\phi_{ij}), \quad (6)$$

其中

$$A_1 = A_0(u, v), \quad A_2 = A_0(u + s_x / (\lambda R), v), \quad A_3 = A_0(u + 2s_x / (\lambda R), v),$$

$$A_4 = A_0(u, v + s_y / (\lambda R)), \quad A_5 = A_0(u + s_x / (\lambda R), v + s_y / (\lambda R)),$$

$$\Delta\phi_{12} = \phi(u, v) - \phi(u + s_x / (\lambda R), v), \quad \Delta\phi_{13} = \phi(u, v) - \phi(u + 2s_x / (\lambda R), v),$$

$$\Delta\phi_{14} = \phi(u, v) - \phi(u, v + s_y / (\lambda R)), \quad \Delta\phi_{15} = \phi(u, v) - \phi(u + s_x / (\lambda R), v + s_y / (\lambda R)),$$

$$\Delta\phi_{23} = \phi(u + s_x / (\lambda R), v) - \phi(u + 2s_x / (\lambda R), v), \quad \Delta\phi_{24} = \phi(u + s_x / (\lambda R), v) - \phi(u, v + s_y / (\lambda R)),$$

$$\Delta\phi_{25} = \phi(u + s_x / (\lambda R), v) - \phi(u + s_x / (\lambda R), v + s_y / (\lambda R)), \quad \Delta\phi_{34} = \phi(u + 2s_x / (\lambda R), v) - \phi(u, v + s_y / (\lambda R)),$$

$$\Delta\phi_{35} = \phi(u + 2s_x / (\lambda R), v) - \phi(u + s_x / (\lambda R), v + s_y / (\lambda R)), \quad \Delta\phi_{45} = \phi(u, v + s_y / (\lambda R)) - \phi(u + s_x / (\lambda R), v + s_y / (\lambda R)),$$

$$\Delta\omega_{ij} = \omega_j - \omega_i.$$

由(6)式可知,传统三光束成像系统^[6]采集的回波信号携带了相位差 $\Delta\phi_{12}$, $\Delta\phi_{14}$, $\Delta\phi_{24}$, 利用剪切方向的相位差 $\Delta\phi_{12}$ 和 $\Delta\phi_{14}$ 可恢复目标相位频谱. 五光束稀疏成像系统不只携带了相位差 $\Delta\phi_{12}$, $\Delta\phi_{14}$, $\Delta\phi_{24}$, 还有相位差 $\Delta\phi_{13}$, $\Delta\phi_{15}$, $\Delta\phi_{23}$, $\Delta\phi_{25}$, $\Delta\phi_{34}$, $\Delta\phi_{35}$ 和 $\Delta\phi_{45}$, 其中剪切方向相位差 $\Delta\phi_{23}$, $\Delta\phi_{25}$ 的增加使得探测器阵元在一维方向上可稀疏一倍. 通过恢复算法获取目标的振幅 $A_0(x, y)$ 和相位 $\phi(x, y)$, 利用傅里叶逆变换才能重构目标图像.

2.2 新方法与其他方法的对比分析

根据SBI原理, 传统三光束成像系统在激光波长和成像距离不变时, 成像分辨率由探测器阵列尺寸决定^[9,18], 当探测器阵列尺寸为 $D_x \times D_y$, 则横向成像分辨率为 $1.43\lambda R/D_x$, 纵向成像分辨率为 $1.43\lambda R/D_y$. 当目标尺寸为 $T_x \times T_y$, 激光发射剪切量应满足 $s_x \leq 2/3(\lambda R/T_x)$, $s_y \leq 2/3(\lambda R/T_y)$ 的约束条件, 探测器阵元间距与激光发射剪切量相等, 即 $d_x = s_x$, $d_y = s_y$, 接收阵列横向维数为 D_x/s_x , 纵向维数为 D_y/s_y . 五光束稀疏采样成像系统的探测器阵列尺寸没有改变, 因此系统成像分辨率与传统三光束成像系统相同.

与传统三光束成像系统相比, 五光束稀疏采样成像系统发射五束相干激光, 多了两路小孔径激光发射装置, 硬件成本有所提高(远远低于未稀疏的探测器阵列成本), 但是携带了目标更多频谱信息, 五光束稀疏采样成像系统的探测器阵元横向或纵向间距扩大至激光发射剪切量的2倍, 即 $d_x = 2s_x$ 或 $d_y = 2s_y$, 则探测器阵列横向维数为 $D_x/(2s_x)$ 或纵向维数为 $D_y/(2s_y)$, 维数降至传统三光束的1/2, 探测器阵元数目也降为传统三光束的1/2, 最终可达到相同的成像分辨率和成像质量, 五光束稀疏采样成像技术大大降低了探测器阵列的研制难度和成本.

实现探测器阵元稀疏时, 为了减少发射系统成本, 研究过四光束成像系统, 其激光发射排布方式如图2所示, 由于缺少相位差 $\Delta\phi_{25}$, 其相位恢复算法示意图如图3所示. 四光束成像系统虽然也可以实现探测器阵列空域一维稀疏, 但是在相位迭代求解时需要较长的收敛时间, 甚至出现不收敛现象, 导致相位求解不准确, 影响了成像质量. 与四光束成像系统相比, 五光束稀疏采样成像系统相位恢复

算法示意图如图4所示, 在相位迭代求解时能较快地收敛. 五光束稀疏采样成像系统多了一路小孔径激光发射装置, 硬件成本略高, 但是成像质量更好.

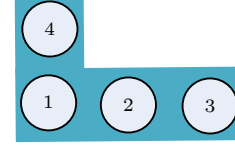


图2 四光束成像系统的激光发射排布方式

Fig. 2. Laser emission arrangement of four-beam imaging system.

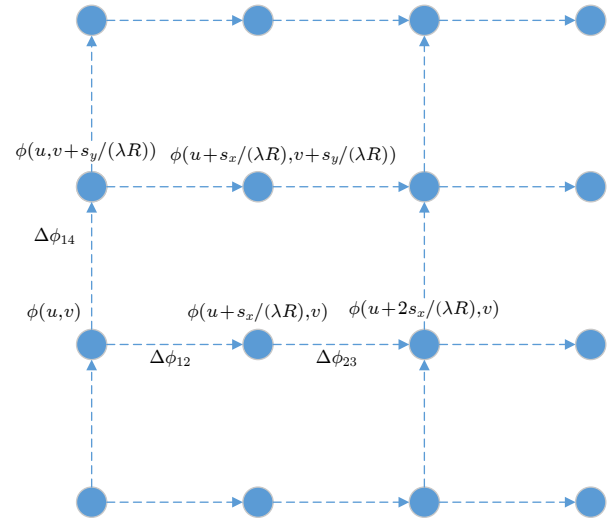


图3 四光束成像相位复原算法示意图

Fig. 3. Schematic diagram of phase retrieval algorithm for four-beam imaging method.

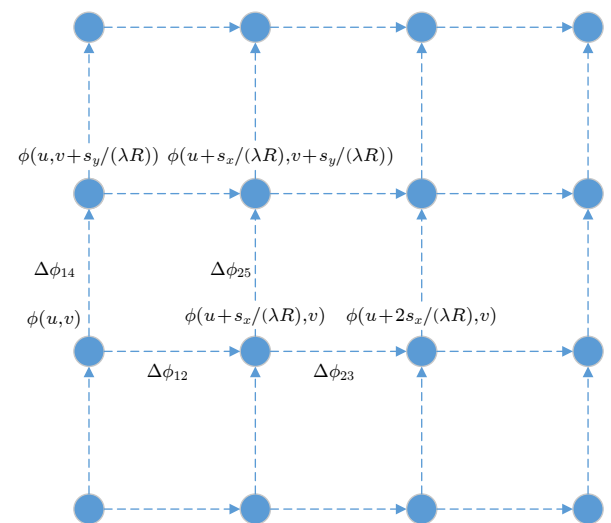


图4 五光束稀疏采样成像相位复原算法示意图

Fig. 4. Schematic diagram of phase retrieval algorithm for five-beam sparse sampling imaging method.

3 图像稀疏重构算法

假设稀疏后的探测器阵列维数为 $N_x \times N_y$, 则

$$x_i = 2(i - N_x/2)s_x, \quad y_j = (j - N_y/2)s_y, \quad (7)$$

其中, i, j 表示探测器阵元序号, $i = 1, \dots, N_x$, $j = 1, \dots, N_y$, 则位于 (x_i, y_j) 的探测器阵元的时域

信号为

$$I(x_i, y_j, t) = \sum_{i=1}^5 E_i^2 A_i^2 + 2 \sum_{i=1}^4 \sum_{j>i}^5 E_i E_j A_i A_j \cos(\Delta\omega_{ij}t + \Delta\phi_{ij}). \quad (8)$$

根据 (8) 式在相应的频率处可提取如下形式的振幅乘积:

$$\begin{aligned} M_{2i-1,j}^x &= E_1 E_2 A_0(u, v) A_0(u + s_x/(\lambda R), v), \\ M_{2i,j}^x &= E_2 E_3 A_0(u + s_x/(\lambda R), v) A_0(u + 2s_x/(\lambda R), v), \\ M_{2i-1,j}^y &= E_1 E_4 A_0(u, v) A_0(u, v + s_y/(\lambda R)), \\ M_{2i,j}^y &= E_2 E_5 A_0(u + s_x/(\lambda R), v) A_0(u + s_x/(\lambda R), v + s_y/(\lambda R)), \\ M_{2i-1,j}^{xy} &= E_2 E_4 A_0(u + s_x/(\lambda R), v) A_0(u, v + s_y/(\lambda R)), \\ M_{2i,j}^{xy} &= E_3 E_5 A_0(u + 2s_x/(\lambda R), v) A_0(u + s_x/(\lambda R), v + s_y/(\lambda R)), \end{aligned} \quad (9)$$

和相位差

$$\begin{aligned} S_{2i-1,j}^x &= \phi(u, v) - \phi(u + s_x/(\lambda R), v), \quad S_{2i,j}^x = \phi(u + s_x/(\lambda R), v) - \phi(u + 2s_x/(\lambda R), v), \\ S_{2i-1,j}^y &= \phi(u, v) - \phi(u, v + s_y/(\lambda R)), \quad S_{2i,j}^y = \phi(u + s_x/(\lambda R), v) - \phi(u + s_x/(\lambda R), v + s_y/(\lambda R)). \end{aligned} \quad (10)$$

3.1 幅值解调

令 $m = 2N_x, n = N_y$, 重新定义

$$x_i = (i - m/2)s_x, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad y_j = (j - n/2)s_y, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

令 $u_i = x_i/(\lambda R), v_j = y_j/(\lambda R)$, 根据 (9) 式, 综合所有探测器阵元的时域信号可得目标振幅 $A_0(u, v)$:

$$A_0(u_i, v_j) = \begin{cases} \frac{1}{E_1} \sqrt{M_{i,j}^x \cdot M_{i,j}^y / M_{i,j}^{xy}}, & i \text{ 为奇数}, \\ \frac{1}{E_2} \sqrt{M_{i,j}^x \cdot M_{i,j}^y / M_{i,j}^{xy}}, & i \text{ 为偶数}. \end{cases} \quad (11)$$

3.2 相位解调

(10) 式转化为如下相位差矩阵:

$$\begin{aligned} S_{ij}^x &= \phi(u, v) - \phi(u + s_x/(\lambda R), v) = \phi_{ij} - \phi_{i+1,j}, \quad i = 1, 2, \dots, m-1, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ S_{ij}^y &= \phi(u, v) - \phi(u, v + s_y/(\lambda R)) = \phi_{ij} - \phi_{i,j+1}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (12)$$

利用最小二乘法, 可将相位差转化为绝对相位的形式^[24]:

$$\phi_{ij} = \frac{1}{4} (\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i,j-1} + S_{ij}^x - S_{i-1,j}^x + S_{ij}^y - S_{i,j-1}^y), \quad 2 \leq i \leq m-1, \quad 2 \leq j \leq n-1. \quad (13)$$

为了消除相位解包裹, 利用 (14) 式代替 (13) 式求解相位^[25]

$$\begin{aligned} \phi_{ij} = \arg \left\{ \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i+1,j} + S_{ij}^x)] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i-1,j} - S_{i-1,j}^x)] \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i,j+1} + S_{ij}^y)] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i,j-1} - S_{i,j-1}^y)] \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

(14) 式所求即为目标频谱 $\phi(u, v)$. 根据 (14) 式, 利用 Gauss-Seidel 数值计算方法可求解相位频谱面.

综合 (11) 式和 (14) 式, 得到目标频谱 $F(u, v) = A_0(u, v) \exp[i\phi(u, v)]$, 再经傅里叶逆变换^[26,27]

$$f(x', y') = \iint F(u, v) \exp[j2\pi(ux' + vy')] du dv, \quad (15)$$

重构目标图像, 通过多幅重构图像的平均处理, 可得目标清晰图像.

3.3 影响成像质量的主要因素分析

五光束稀疏采样成像系统内影响成像质量的因素有发射剪切量误差、探测器间距误差、激光能

量配比、激光功率稳定性、激光频率稳定性. 需要指出的是系统要求五束激光能量均等, 发射剪切量误差和探测器间距误差是最主要的两个影响因素.

发射剪切量误差: 假设光束 2 相对于光束 1 的横向发射剪切量误差为 Δs_1 , 光束 3 相对于光束 1 的横向发射剪切量误差为 Δs_2 , 光束 4 相对于光束 1 的纵向发射剪切量误差为 Δs_3 , 光束 5 相对于光束 1 的横向发射剪切量误差为 Δs_4 , 光束 5 相对于光束 1 的纵向发射剪切量误差为 Δs_5 , 则探测器阵元接收到的回波信号中直接用于恢复目标相位频谱的四个相位差与 (6) 式不同, 具体如下所示:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{12} &= \phi(u, v) - \phi(u + (s_x + \Delta s_1)/(\lambda R), v), \\ \Delta\phi_{14} &= \phi(u, v) - \phi(u, v + (s_y + \Delta s_3)/(\lambda R)), \\ \Delta\phi_{23} &= \phi(u + (s_x + \Delta s_1)/(\lambda R), v) - \phi(u + (2s_x + \Delta s_2)/(\lambda R), v), \\ \Delta\phi_{25} &= \phi(u + (s_x + \Delta s_1)/(\lambda R), v) - \phi(u + (s_x + \Delta s_4)/(\lambda R), v + (s_y + \Delta s_5)/(\lambda R)). \end{aligned} \quad (16)$$

探测器间距误差: 假设每个探测器阵元在两个方向上的随机误差为 Δx_{ij} 和 Δy_{ij} , 那么探测器阵元接收到的回波信号中直接用于恢复目标相位频谱的四个相位差与 (6) 式也不同, 具体如下所示:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{12} &= \phi(u + \Delta x_{ij}/(\lambda R), v + \Delta y_{ij}/(\lambda R)) - \phi(u + (s_x + \Delta x_{ij})/(\lambda R), v + \Delta y_{ij}/(\lambda R)), \\ \Delta\phi_{14} &= \phi(u + \Delta x_{ij}/(\lambda R), v + \Delta y_{ij}/(\lambda R)) - \phi(u + \Delta x_{ij}/(\lambda R), v + (s_y + \Delta y_{ij})/(\lambda R)), \\ \Delta\phi_{23} &= \phi(u + (s_x + \Delta x_{ij})/\lambda R, v + \Delta y_{ij}/(\lambda R)) - \phi(u + (2s_x + \Delta x_{ij})/(\lambda R), v + \Delta y_{ij}/(\lambda R)), \\ \Delta\phi_{25} &= \phi(u + (s_x + \Delta x_{ij})/\lambda R, v + \Delta y_{ij}/(\lambda R)) - \phi(u + (s_x + \Delta x_{ij})/(\lambda R), v + (s_y + \Delta y_{ij})/(\lambda R)). \end{aligned} \quad (17)$$

从 (16) 式和 (17) 式可以看出, 无论是发射剪切量误差, 还是探测器间距误差, 使得每个探测器阵元上探测到的相位差无法使其相位与相邻阵元的相位联系起来, 在相位复原时, 利用 (14) 式进行迭代求解所得到的目标相位频谱不准确. 发射剪切量和探测器间距的误差越大, 解调出来的目标相位频谱误差越大, 成像质量越差.

4 仿真实验

下面利用仿真验证所提图像稀疏重构算法的有效性, 并利用 Strehl 比 (Strehl ratios) 评价重构图像质量. Strehl 比的定义如下^[16]:

SR =

$$\frac{\left| \iint O_T(x, y) O_R(x, y) dx dy \right|^2}{\iint O_T(x, y) O_T^*(x, y) dx dy \iint O_R(x, y) O_R^*(x, y) dx dy},$$

其中, $O_T(x, y)$ 为无误差重建图像的强度分布, $O_R(x, y)$ 为有误差重建图像的强度分布, “*” 表示求共轭. Strehl 比越趋近于 1, 表明成像质量越好.

设置仿真参数: 激光波长为 532 nm, 成像距离为 1000 km, 目标大小为 4 m, 采样频率为 1200 Hz, 采样点数为 9600. 五束光之间的频移量分别为 40 MHz, 40 MHz + 40 Hz, 40 MHz + 160 Hz, 40 MHz + 400 Hz 和 40 MHz + 480 Hz, 剪切量 s_x 为 0.1 m、 s_y 为 0.1 m, 探测器阵元间距 $dx = 0.2$ m、 $dy = 0.1$ m, 接收阵列维数为 45×90 . 为了与传统三光束图像重构方法作比较, 三束光之间的频移量分别为 40 MHz, 40 MHz + 80 Hz, 40 MHz + 120 Hz, 剪切量 s_x 为 0.1 m、 s_y 为 0.1 m, 探测器阵元间距 $dx = 0.1$ m、 $dy = 0.1$ m, 接收阵列维数为 90×90 . 在探测器阵元回波信号中添加高斯噪声, 分别重构出信噪比为 10 和 1 dB 时的目标图像, 所有重构图像均为 10 次平均的结果.

选用三种不同的灰度图像作为目标, 如图 5(a), 图 5(d) 和图 5(g). 当回波信号信噪比为 10 dB 时, 传统三光束算法的重构图像及其 Strehl 比如图 5(b), 图 5(e) 和图 5(h) 所示, 五光束稀疏重构算法的重

构图像及其 Strehl 比如图 5(c), 图 5(f) 和图 5(i) 所示, 两种方法的回波信号振幅频谱分别如图 6(a) 和图 6(b) 所示. 从图 6 可知, 稀疏采样方法采集到的回波能量信号是 10 个不同拍频余弦信号的叠

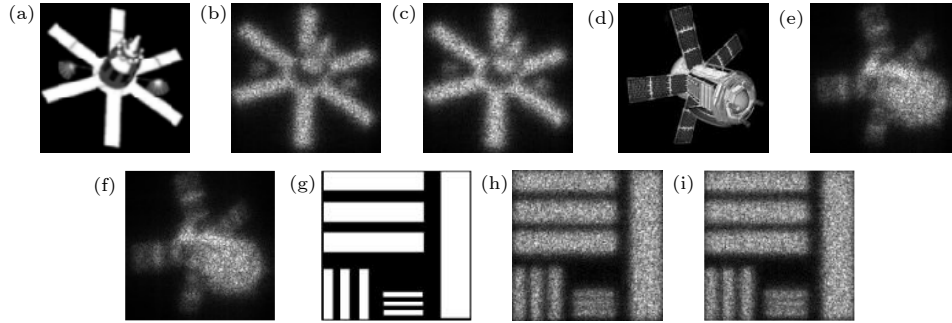


图 5 重构图像及其 Strehl 比 (SNR: 10 dB) (a), (d), (g) 原始图像, $SR = 1$; (b) 传统三光束算法, $SR = 0.8033$; (e) 传统三光束算法, $SR = 0.8444$; (h) 传统三光束算法, $SR = 0.8314$; (c) 稀疏重构算法, $SR = 0.7935$; (f) 稀疏重构算法, $SR = 0.8482$; (i) 稀疏重构算法, $SR = 0.8367$

Fig. 5. The reconstructed image and Strehl ratios (SNR: 10 dB): (a), (d), (g) Origin target image, $SR = 1$; (b) traditional method, $SR = 0.8033$; (e) traditional method, $SR = 0.8444$; (h) traditional method, $SR = 0.8314$; (c) sparse reconstruction method, $SR = 0.7935$; (f) sparse reconstruction method, $SR = 0.8482$; (i) sparse reconstruction method, $SR = 0.8367$.

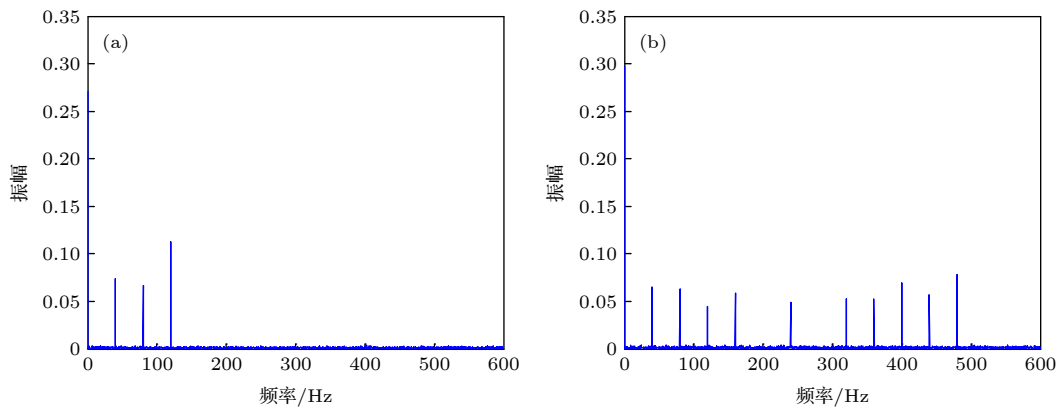


图 6 回波信号振幅频谱 (SNR: 10 dB) (a) 传统三光束方法; (b) 稀疏采样方法

Fig. 6. Amplitude spectrum of echo signals (SNR: 10 dB): (a) Traditional method; (b) sparse sampling method.

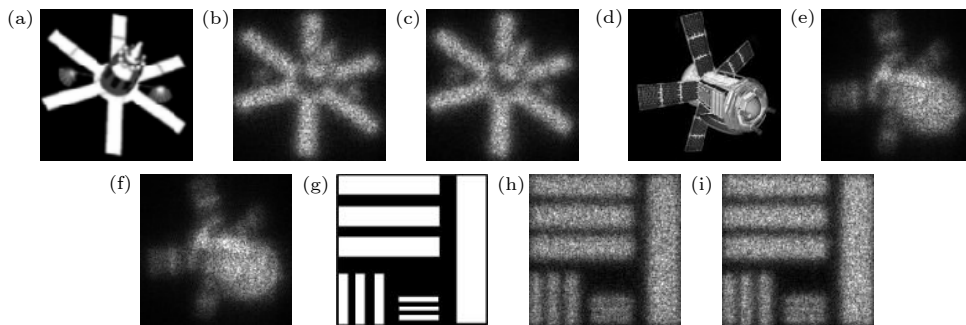


图 7 重构图像及其 Strehl 比 (SNR: 1 dB) (a), (d), (g) 原始图像, $SR = 1$; (b) 传统三光束算法, $SR = 0.7554$; (e) 传统三光束算法, $SR = 0.8309$; (h) 传统三光束算法, $SR = 0.7954$; (c) 稀疏重构算法, $SR = 0.7589$; (f) 稀疏重构算法, $SR = 0.8250$; (i) 稀疏重构算法, $SR = 0.8092$

Fig. 7. The reconstructed image and Strehl ratios (SNR: 1 dB): (a), (d), (g) Origin target image, $SR = 1$; (b) traditional method, $SR = 0.7935$; (e) traditional method, $SR = 0.8309$; (h) traditional method, $SR = 0.7954$; (c) sparse reconstruction method, $SR = 0.7589$; (f) sparse reconstruction method, $SR = 0.8250$; (i) sparse reconstruction method, $SR = 0.8092$.

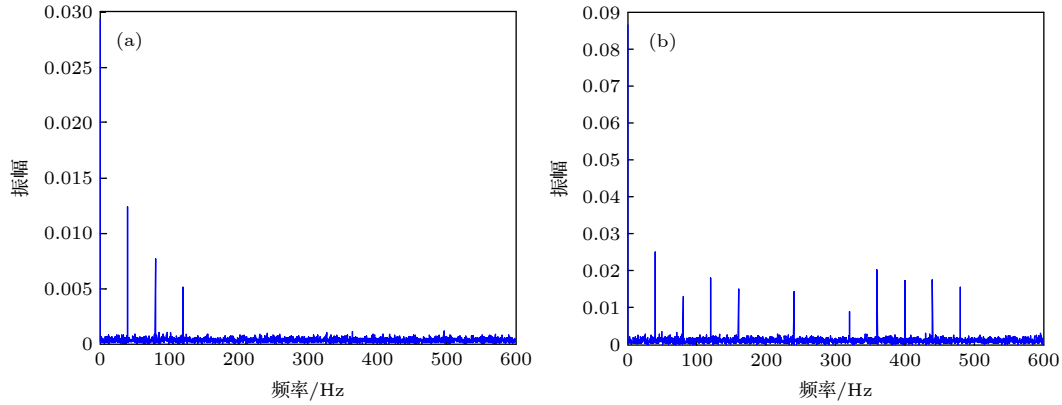


图 8 回波信号振幅频谱 (SNR: 1 dB) (a) 传统三光束方法; (b) 稀疏采样方法

Fig. 8. Amplitude spectrum of echo signals (SNR: 1 dB): (a) Traditional method; (b) sparse sampling method.

加, 携带了目标更多频谱信息. 当回波信号信噪比为 1 dB 时, 两种方法的重构结果如图 7 所示, 回波信号振幅频谱如图 8 所示.

根据图 5 和图 7 仿真结果可知, 重构图像质量随着回波信号信噪比下降而降低. 当回波信号信噪比相同时, 两种重构算法的重构图像 Strehl 比几乎相等, 说明图像质量几乎相同. 与传统三光束方法相比, 所提的稀疏重构算法在探测器阵元数目稀疏一倍后, 仍能重构出目标图像, 且成像质量相同.

5 结 论

本文针对 SBI 系统探测器阵列空域稀疏采样技术, 推导了稀疏采样成像理论公式, 提出了目标图像稀疏重构算法. 在经稀疏采样的回波信号中提取目标的相位差和振幅信息, 通过波前恢复重构目标图像. 仿真验证了算法的有效性, 较传统三光束成像方法, 探测器阵元数目降为原来的 1/2, 且成像质量不变. 所提空域稀疏重构技术突破了探测器阵元间距与发射剪切量严格相等的限制, 使得探测器阵列数目大大减少, 降低了探测器阵列的研制难度和成本, 为 SBI 技术对低轨道运动目标成像的工程应用转化奠定理论基础.

参考文献

- [1] Hutchin R A 1993 *Proc. SPIE* **2029** 161
- [2] Voelz D G, Gonglewski J D, Idell P S 1993 *Proc. SPIE* **2029** 169
- [3] Hutchin R A 2012 US Patent 20120162631 [2012-6-28]
- [4] Hutchin R A 2012 US Patent 20120292481 [2012-11-22]
- [5] Voelz D G 1995 *Proc. SPIE* **2566** 74
- [6] Voelz D G, Belsher J F, Ulibarri A L, Gamiz V 2002 *Proc. SPIE* **4489** 35
- [7] Lan F Y, Luo X J, Chen M L, Zhang Y, Liu H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 204202 (in Chinese) [兰富洋, 罗秀娟, 陈明徕, 张羽, 刘辉 2017 物理学报 **66** 204202]
- [8] Luo X J, Liu H, Zhang Y, Chen M L, Lan F Y 2019 *Chin. Opt.* **12** 753 (in Chinese) [罗秀娟, 刘辉, 张羽, 陈明徕, 兰富洋 2019 中国光学 **12** 753]
- [9] Lan F Y 2019 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [兰富洋 2019 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [10] 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]
- [11] Fairchild P, Payne I 2013 *IEEE Aerospace Conference Big Sky Montana, USA*, March 2–9, 2013 p1
- [12] Rider D B, Voelz D G, Bush K A, Magee E 1993 *Proc. SPIE* **2029** 150
- [13] Bush K A, Barnard C C, Voelz D G 1996 *Proc. SPIE* **2828** 362
- [14] Sica L 1996 *Appl. Opt.* **35** 264
- [15] Landesman B T, Olson D F 1994 *Proc. SPIE* **2302** 14
- [16] Lan F Y, Luo X J, Fan X W, Zhang Y, Chen M L, Liu H, Jia H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 204201 (in Chinese) [兰富洋, 罗秀娟, 樊学武, 张羽, 陈明徕, 刘辉, 贾辉 2018 物理学报 **67** 204201]
- [17] Gamiz V L 1994 *Proc. SPIE* **2302** 2
- [18] Stahl S M, Kremer R, Fairchild P, Hughes K, Spivey B 1996 *Proc. SPIE* **2847** 150
- [19] Olson D F, Long S M, Ulibarri L J 2000 *Proc. SPIE* **4091** 323
- [20] Lu C M, Chen M L, Luo X J, Zhang Y, Liu L, Lan F Y, Cao B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 114201 (in Chinese) [陆长明, 陈明徕, 罗秀娟, 张羽, 刘辉, 兰富洋, 曹蓓 2017 物理学报 **66** 114201]
- [21] Fienup J R *US Patent* 006597304 B2 [2003-7-22]
- [22] Speckle-Based Imaging, Optical Physics Company <http://www.opci.com/technologies/speckle-based-imaging> [2017-1-9]
- [23] Dong L, Lu Z W, Liu X Y 2019 *Chin. Opt.* **12** 138 (in Chinese) [董磊, 卢振武, 刘欣悦 2019 中国光学 **12** 138]
- [24] Takajo H, Takahashi T 1988 *J. Opt. Soc. Am. A* **5** 416
- [25] Idell P S, Gonglewski J D 1990 *Opt. Lett.* **15** 1309
- [26] Zhang Y, Li Z G, Liu H, Chen M L, Luo X J, Ma C W, Zhang H L 2021 *Acta Photonica Sin.* **50** 1201004 (in Chinese) [张羽, 李治国, 刘辉, 陈明徕, 罗秀娟, 马彩文, 张怀利 2021 光子学报 **50** 1201004]
- [27] Xiang M, Pan A, Zhao Y Y, Fan X W, Zhao H, Li C, Yao B L 2021 *Opt. Lett.* **46** 29

Spatial domain sparse reconstruction algorithm of sheared beam imaging^{*}

Chen Ming-Lai^{1)2)3)†} Liu Hui¹⁾²⁾³⁾ Zhang Yu¹⁾³⁾ Luo Xiu-Juan¹⁾²⁾³⁾
 Ma Cai-Wen^{1)2)3)‡} Yue Ze-Lin¹⁾²⁾ Zhao Jing¹⁾²⁾

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*)

3) (*Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(Received 18 March 2022; revised manuscript received 10 June 2022)

Abstract

Sheared beam imaging (SBI) is considered a computational imaging technique that transmits three sheared coherent laser beamlets for illumination, and a sensor array to receive the intensity of the speckle pattern reflected from the target. The SBI can be used to image remote objects through a turbulent medium with no need of any adaptive optics. However, while imaging low-orbit moving targets, the number of detectors of sensor array required by the receiving system of SBI is very large, and the development of sensor array is difficult and costly. In this work, a spatial domain sparse sampling technique is proposed for the SBI system through transmitting five laser beamlets to illuminate the target carrying more of its spectral information, which can reduce the number of detectors of the sensor array. Firstly, the principle of the sparse imaging technique is deduced. Then, a sparse reconstruction algorithm is studied. The phase difference and amplitude information of the target in the echo signal after sparse sampling can be extracted accurately by searching for the accurate positions of the beat frequency components. The wavefront phases can be demodulated by the least-squares method, and wavefront amplitude can be obtained by the algebraic operation of speckle amplitude. The reconstructed wavefront is used to formulate the two-dimension image of the target. Theoretically, without affecting the resolution, the number of detectors of the sensor array can be reduced to half of the traditional three-beam method, which breaks through the limitation that the detector spacing of sensor array is equal to the shear length of beamlet. From the simulation results, when the number of detectors of the sensor array is reduced by 50%, the proposed sparse reconstruction algorithm has almost the same quality as the reconstructed image with the traditional three-beam method.

Keywords: sheared beam imaging, spatial domain sparse sampling, sparse reconstruction algorithm, sensor array

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

DOI: 10.7498/aps.71.20220494

^{*} Project supported by the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2020JQ-438).

[†] Corresponding author. E-mail: chenminglai@opt.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: cwma@opt.ac.cn



剪切光束成像技术稀疏重构算法

陈明徕 刘辉 张羽 罗秀娟 马彩文 岳泽霖 赵晶

Spatial domain sparse reconstruction algorithm of sheared beam imaging

Chen Ming-Lai Liu Hui Zhang Yu Luo Xiu-Juan Ma Cai-Wen Yue Ze-Lin Zhao Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 194201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220494

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220494>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

上行链路大气波前畸变对剪切光束成像技术的影响

Effect of uplink atmospheric wavefront distortion on image quality of sheared-beam imaging

物理学报. 2018, 67(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181144>

频域稀疏采样和激光成像方法

Sparse sampling in frequency domain and laser imaging

物理学报. 2022, 71(5): 058705 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211408>

基于稀疏重构的尾波干涉成像方法

Imaging through coda wave interferometry via sparse reconstruction

物理学报. 2019, 68(19): 199101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190831>

基于稀疏低秩特性的水下非均匀光场偏振成像技术研究

Clear underwater vision in non-uniform scattering field by low-rank-and-sparse-decomposition-based polarization imaging

物理学报. 2021, 70(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210314>

基于稀疏优化的烟羽断层重建方法

Tomographic reconstruction of stack plume based on sparse optimization

物理学报. 2019, 68(16): 164205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190268>

线性剪切空间调制快拍成像动态定标技术

Dynamic calibration of linear shear spatial modulation snapshot imaging polarimeter

物理学报. 2022, 71(15): 154205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220229>