



## 频域稀疏采样和激光成像方法

崔岸婧 李道京 吴疆 周凯 高敬涵

### Sparse sampling in frequency domain and laser imaging

Cui An-Jing Li Dao-Jing Wu Jiang Zhou Kai Gao Jing-Han

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 058705 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211408

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211408>

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

#### 基于自适应阈值方法实现迭代降噪鬼成像

Iterative denoising of ghost imaging based on adaptive threshold method

物理学报. 2018, 67(24): 244201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181240>

#### 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>

#### 基于空谱干涉和频域分割的超快激光时空耦合特性的单次测量方法

Single-frame measurement of complete spatiotemporal field of ultrashort laser pulses using frequency domain separate spectral interferometry

物理学报. 2022, 71(3): 034203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211665>

#### 激光相干场成像散斑噪声复合去噪方法

Compound denoising method of laser speckle noise in laser inherent field imaging

物理学报. 2019, 68(5): 054206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181578>

#### 三种降采样成像策略的性能优化以及与传统傅里叶望远镜的比较

Performance optimization of three down-sampling imaging strategies and their comparison with the conventional Fourier telescope

物理学报. 2019, 68(7): 074203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181801>

#### 利用气泡探测器测量激光快中子

Laser fast neutron measured by bubble detector

物理学报. 2018, 67(22): 222101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181035>

# 频域稀疏采样和激光成像方法\*

崔岸婧<sup>1)2)</sup> 李道京<sup>1)†</sup> 吴疆<sup>1)2)</sup> 周凯<sup>1)2)</sup> 高敬涵<sup>1)2)</sup>

1) (中国科学院空天信息创新研究院, 微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2021 年 7 月 30 日收到; 2022 年 2 月 12 日收到修改稿)

激光的单色性和自然图像频谱稀疏且集中在低频区间的特点, 使图像频谱稀疏采样成像成为可能. 基于小规模激光探测器, 引入参考激光, 本文提出了频域稀疏采样激光成像方法. 介绍了频域稀疏采样激光成像的原理和成像系统结构, 推导了激光回波重构复频谱的表达式, 给出了重构频谱和复图像的仿真结果并分析了信号参数对重构效果的影响, 同时采用相干系数、均方误差和结构相似度来评价其重构效果. 规模为  $256 \times 256$  的激光回波复图像仿真表明, 5 个拼接  $1/4 \times 1/4$  规模频域探测器组成的近似十字型稀疏采样结构, 在约 31.25% (5/16) 的频域稀疏采样条件下, 仍可获得较好的重构频谱和重构复图像.

**关键词:** 激光成像, 频域稀疏采样, 激光探测器, 图像重构

**PACS:** 87.63.lt, 42.79.Pw, 42.60.-v, 42.62.-b

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211408

## 1 引言

目前大规模可见光探测器相机已达到  $30k \times 30k$  量级, 高分辨率宽幅成像的需求在推动探测器规模不断扩大的同时, 也产生了数据量大、传输和处理困难等问题.

前端先大数据量采集, 然后后端再数据压缩, 这似乎是一个前后矛盾的过程. 激光具有窄带性和单色性, 由傅里叶光学成像  $4f$  实验<sup>[1,2]</sup> 和文献 [3, 4] 可知, 利用激光探测获取的目标信号在频域稀疏且频谱集中在低频区间. 在此基础上, 利用傅里叶透镜将激光图像变换到频域, 在其低频区间实施稀疏采样, 进一步通过反演实现激光成像具有可行性.

将小规模面阵探测器设置在激光回波频谱低频区间, 用频域稀疏采样的方式可等效对激光回波复图像的二维低频滤波, 在仅丢失图像部分高频信

息的情况下, 以小幅牺牲分辨率为代价减少图像数据量, 或可大幅缓解探测器规模和高分宽幅成像的矛盾. 近年快速发展的计算成像技术<sup>[5]</sup> 为频域稀疏采样激光成像思路提供了一定程度的理论和实践支持, 如文献 [6, 7] 将傅里叶叠层成像技术用于远距离遥感成像问题.

文献 [8] 探讨了图像频域稀疏激光成像问题, 给出了一些初步仿真结果, 基于激光本振相干探测技术体制, 其技术实现原理清楚. 2020 年美国 Point Cloud 公司基于硅光芯片的 FMCW 激光雷达相干阵列探测器 (阵元规模为  $512(32 \times 16)$ )<sup>[9]</sup>, 使频域稀疏采样激光成像成为可能. 考虑到目前大量应用的激光探测器仍然采用没有激光本振的直接探测体制, 主要实现信号平方律检波功能, 为便于区分, 本文将其简称为直接探测器, 本文在文献 [8] 和时域相干探测<sup>[10]</sup> 的基础上研究了基于直接探测器的频域稀疏采样激光成像问题.

\* 中科院重点部署项目 (批准号: E03701010F) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn

## 2 频域稀疏采样激光成像原理

基于直接探测器的频域稀疏采样成像系统结构如图1所示,其中F为经接收望远镜聚焦后的激光回波复图像,下文将激光回波复图像简称为激光回波, $f$ 表示傅里叶透镜的焦距.激光器发射相同的两束激光,其中一束用于照射目标以获取激光回波,另一束作为参考激光,经空间相位调制后用于激光回波频谱的重构.激光回波经过傅里叶透镜处理,其频谱和参考激光的相干光由直接探测器接收.空间光调制器采用时分方式,对参考激光实现 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 相移处理,以获取激光回波频谱的实部和虚部.为减少数据量,采用小规模面阵直接探测器,并在低频区由5个 $1/4 \times 1/4$ 规模频域探测器构成十字型.

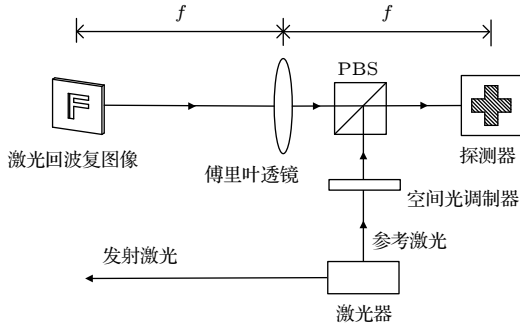


图1 基于直接探测器的频域稀疏采样成像系统结构  
Fig. 1. Structure of the frequency-domain sparse sampling imaging system based on direct detector.

在对基于频域直接探测器的复图像重构过程进行分析前,做出以下假设:

- 1) 面阵探测器中各直接探测像元位于  $x$ - $y$  平

面上;

2) 频域采样过程中,激光器、目标和傅里叶透镜之间的距离固定,激光由激光器传播至傅里叶透镜所经过的光程为定值;

3) 在空间光调制器对参考激光做 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 相移过程中,激光回波复图像保持不变;

4) 参考激光的幅度远大于激光回波频谱的幅度.

激光回波为复信号,经过傅里叶透镜处理后所得频谱为复数,因此可设置激光回波频谱的表达式为

$$U_1(x, y, t) = a_1(x, y) e^{j\theta_1(x, y, t)}, \quad (1)$$

双路参考激光的表达式为

$$U_2(x, y, t) = a_2(x, y) e^{j\theta_2(x, y, t)}, \quad (2)$$

参考激光经空间光调制器相移 $90^\circ$ 后的表达式为

$$U'_2(x, y, t) = a_2(x, y) e^{j[\theta_2(x, y, t) - \frac{\pi}{2}]}, \quad (3)$$

式中, $a_1(x, y)$ 和 $a_2(x, y)$ 分别为回波频谱和参考激光在探测器平面上的幅度, $\theta_1(x, y, t) = 2\pi f_0 t + \varphi_1(x, y)$ 和 $\theta_2(x, y, t) = 2\pi f_0 t + \varphi_2(x, y)$ 分别表示回波频谱和参考激光在探测器平面上的相位, $f_0$ 为激光载频, $t$ 为快时间, $\varphi_1(x, y)$ 和 $\varphi_2(x, y)$ 分别为回波频谱和参考激光在探测器平面上坐标 $(x, y)$ 位置上的初始相位.

文献[10]表明,同源同频(同波长)参考激光和激光回波具有时域相干性,傅里叶透镜对每个快时间时刻的激光回波复图像在二维空间域做傅里叶变换,并未改变激光回波的时域相干性,因此激光回波频谱与参考激光在时域也具有相干性.

激光回波频谱和参考激光在探测器平面上相干后的光强[11,12]为

$$\begin{aligned} I_1(x, y, t) &= [U_1(x, y, t) + U_2(x, y, t)][U_1(x, y, t) + U_2(x, y, t)]^* \\ &= a_1^2(x, y) + a_2^2(x, y) + 2a_1(x, y)a_2(x, y)\cos[\theta_1(x, y, t) - \theta_2(x, y, t)] \\ &= a_1^2(x, y) + a_2^2(x, y) + 2a_1(x, y)a_2(x, y)\cos[\varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y)] = I_1(x, y). \end{aligned} \quad (4)$$

激光回波频谱和相移 $90^\circ$ 后的参考激光在探测器平面上相干后的光强为

$$\begin{aligned} I_Q(x, y, t) &= [U_1(x, y, t) + U'_2(x, y, t)][U_1(x, y, t) + U'_2(x, y, t)]^* \\ &= a_1^2(x, y) + a_2^2(x, y) + 2a_1(x, y)a_2(x, y)\cos\left[\theta_1(x, y, t) - \theta_2(x, y, t) + \frac{\pi}{2}\right] \\ &= a_1^2(x, y) + a_2^2(x, y) - 2a_1(x, y)a_2(x, y)\sin[\theta_1(x, y, t) - \theta_2(x, y, t)] \\ &= a_1^2(x, y) + a_2^2(x, y) - 2a_1(x, y)a_2(x, y)\sin[\varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y)] = I_Q(x, y), \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $*$  表示信号的共轭,  $\theta_1(x, y, t) - \theta_2(x, y, t) = \varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y)$  消除了激光载波的影响.

由假设 3) 可得  $a_2(x, y) \gg a_1(x, y)$ , 因此 (4) 式和 (5) 式中的  $a_1^2(x, y)$  可忽略. 用功率计可获取参考激光的光强  $a_2^2(x, y)$ , 经换算可将 (4) 式和 (5) 式转化为激光回波频谱实部和虚部的表达式

$$\begin{aligned}\hat{S}_I(x, y) &= a_1(x, y) \cos[\theta_1(x, y, t) - \theta_2(x, y, t)] \\ &\approx \frac{1}{2} \left[ \frac{I_I(x, y)}{a_2(x, y)} - a_2(x, y) \right],\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\hat{S}_Q(x, y) &= a_1(x, y) \sin[\theta_1(x, y, t) - \theta_2(x, y, t)] \\ &\approx \frac{1}{2} \left[ a_2(x, y) - \frac{I_Q(x, y)}{a_2(x, y)} \right].\end{aligned}\quad (7)$$

由 (6) 式和 (7) 式组合可得复频谱

$$\begin{aligned}\hat{S}(x, y) &= a_1(x, y) e^{j[\theta_1(x, y, t) - \theta_2(x, y, t)]} \\ &= a_1(x, y) e^{j[\varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y)]},\end{aligned}\quad (8)$$

因  $\theta_1(x, y, t) - \theta_2(x, y, t)$  仅为  $x$ - $y$  平面上的变量, 该复频谱在任意时刻固定. (8) 式所示复频谱与激光回波频谱  $a_1(x, y) e^{j\varphi_1(x, y)}$  存在相位差, 当参考激光的初始相位  $\varphi_2(x, y) = 0$  时, 激光回波频谱恢复效果较好; 当参考激光的初始相位  $\varphi_2(x, y) = \pi/2$  时, 激光回波频谱的幅度仍能较好恢复, 但重构频谱与激光回波频谱正交.

当设置参考激光的初始相位为 0 时, (8) 式重构频谱经傅里叶逆变换可得激光回波, 即实现图像的重构.

### 3 频谱与图像重构的仿真分析

目前涉及激光雷达回波复图像研究的文献不多, 与微波成像雷达<sup>[13]</sup>类似, 激光成像雷达回波信

号<sup>[14]</sup>的初始相位也应由目标斜距决定, 因此激光回波复图像的相位与其幅度应具有强相关性, 部分傅里叶叠层成像文献<sup>[15, 16]</sup>对复图像的幅度和相位不建立相关性, 会造成复图像物理意义不明确.

受实验条件所限并使问题简化, 本文仿真中假定激光回波复图像的相位与其灰度图相同, 傅里叶叠层成像<sup>[4,6,7]</sup>研究工作中也常做这种假定.

图 2 给出本文仿真分析所用的像素规模为  $256 \times 256$  的复图像幅度图, 设置该复图像的相位图与幅度图一致, 且相位的变化范围设置为  $0-2\pi$ . 根据第 2 节中推导仿真激光回波频谱和图像的重构. 本文在仿真中设置参考激光和激光回波频谱的幅度关系为  $a_2(x, y) = 30\mu[a_1(x, y)]$ ,  $a_2(x, y)$  为不随  $x$  和  $y$  变化的固定值, 参考激光的初始相位  $\varphi_2(x, y) = 0$ , 其中  $\mu(\cdot)$  表示取均值, 实际工作中可在没有参考激光的条件下用频域直接探测器大致估计  $a_1(x, y)$  的均值.



图 2 激光回波复图像幅度图

Fig. 2. Laser echo complex image amplitude diagram.

#### 3.1 面阵探测器重构频谱和图像

在面阵中满布  $256 \times 256$  个直接探测器的情况下, 仿真激光回波频谱和图像的重构, 仿真结果如图 3 至图 5 所示. 由仿真结果可见, 面阵探测器重构图像与激光回波图像基本一致.

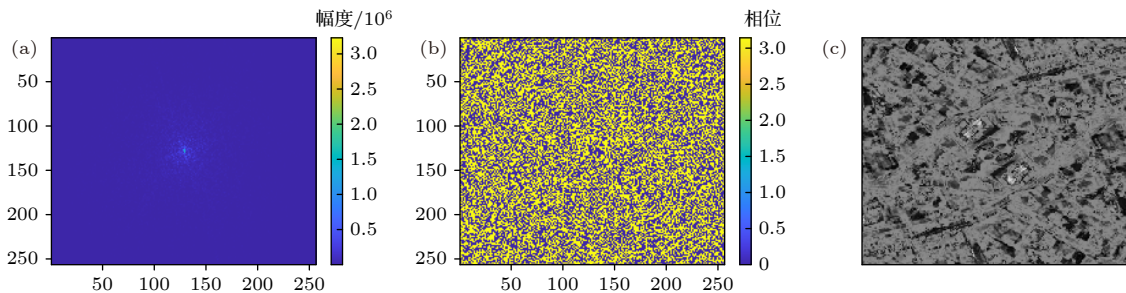


图 3 面阵探测器频谱实部重构 (a) 频谱幅度; (b) 频谱相位; (c) 图像

Fig. 3. Reconstruction of the real part of the plane array detector signals' spectrum: (a) Amplitude of the spectrum; (b) phase of the spectrum; (c) image.



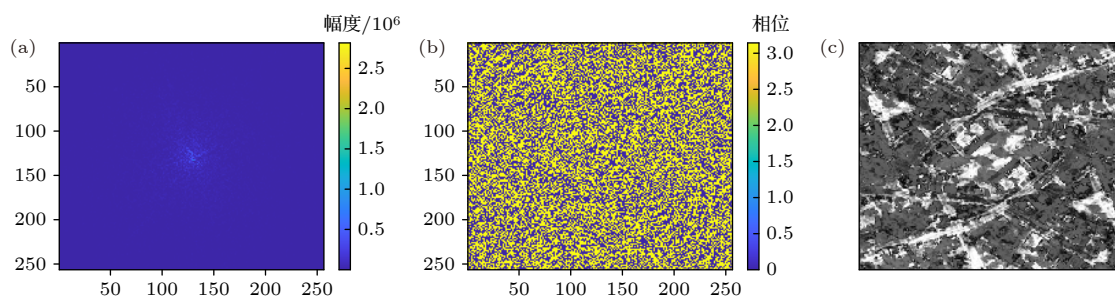


图 4 面阵探测器频谱虚部重构 (a) 频谱幅度; (b) 频谱相位; (c) 图像

Fig. 4. Reconstruction of the imaginary part of the plane array detector signals' spectrum: (a) Amplitude of the spectrum; (b) phase of the spectrum; (c) image.

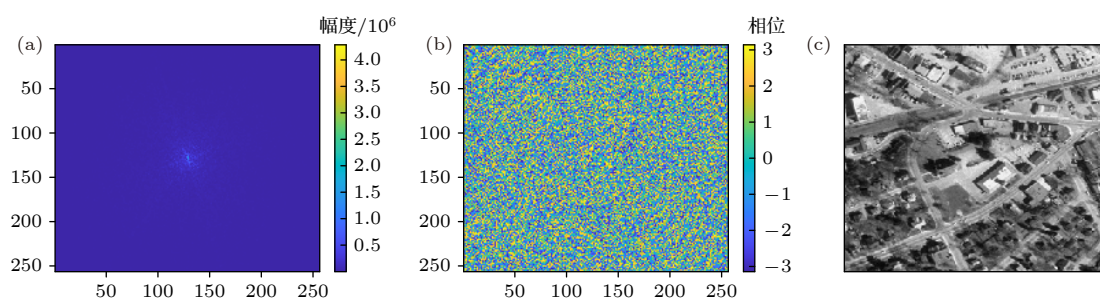


图 5 面阵探测器频谱重构 (a) 频谱幅度; (b) 频谱相位; (c) 图像

Fig. 5. Reconstruction of the plane array detector signals' spectrum: (a) Amplitude of the spectrum; (b) phase of the spectrum; (c) image.

### 3.2 稀疏面阵探测器重构频谱和图像

用 5 个  $1/4 \times 1/4$  规模频域直接探测器拼接构成十字型的情况下, 仿真激光回波频谱和图像的重构, 探测器范围如图 6 所示, 仿真结果如图 7 至图 9 所示. 图 9 与图 5 对比可见, 面阵探测器重构复图像效果优于十字型探测器重构复图像, 频域稀疏导致激光回波频谱部分信息损失.

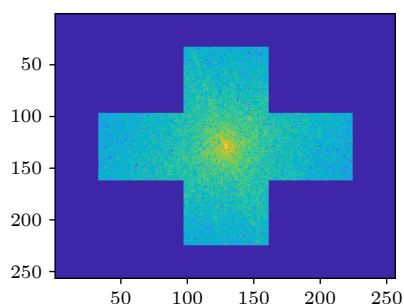

 图 6 5 个  $1/4 \times 1/4$  规模频域探测器拼接构成十字型探测范围

Fig. 6. Cross detection range constituted by five  $1/4 \times 1/4$  scale frequency domain detectors.

### 3.3 重构效果评价

本文采用相干系数<sup>[17]</sup>、均方误差和结构相似

度<sup>[18,19]</sup>评价激光回波复图像和频谱的重构效果. 以下将在面阵探测器和稀疏面阵探测器的条件下, 根据 (8) 式重构所得频谱及其经傅里叶逆变换所得复图像分别定义为面阵探测器重构频谱、面阵探测器重构复图像、稀疏面阵探测器重构频谱和稀疏面阵探测器重构复图像.

相干系数表示重构复图像 (频谱) 与激光回波复图像 (频谱) 之间的线性关系, 其范围为  $[0, 1]$ , 当相干系数接近 1 时, 复图像 (频谱) 的重构效果越好, 其定义式为

$$\gamma = \left| \frac{E(\hat{S}S^*)}{\sqrt{E(\hat{S}\hat{S}^*)E(SS^*)}} \right|, \quad (9)$$

式中,  $E(\cdot)$  表示计算数学期望, 也可用平均值替代,  $S$  为激光回波复图像或频谱,  $\hat{S}$  为重构复图像或频谱.

均方误差表征重构复图像 (频谱) 与激光回波复图像 (频谱) 的差异程度, 其表达式为

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{s}_i - s_i)^2, \quad (10)$$

式中  $N$  表示复图像 (频谱) 的规模, 本文中  $N = 256 \times$

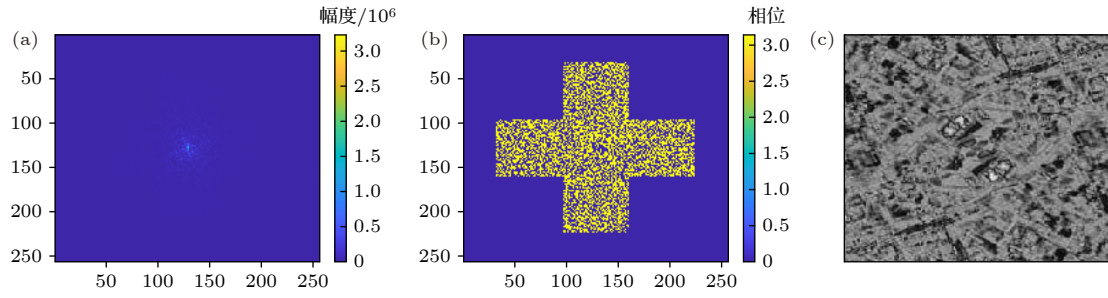


图7 稀疏面阵探测器频谱实部重构 (a) 频谱幅度; (b) 频谱相位; (c) 图像

Fig. 7. Reconstruction of the real part of the sparse plane array detector signals' spectrum: (a) Amplitude of the spectrum; (b) phase of the spectrum; (c) image.

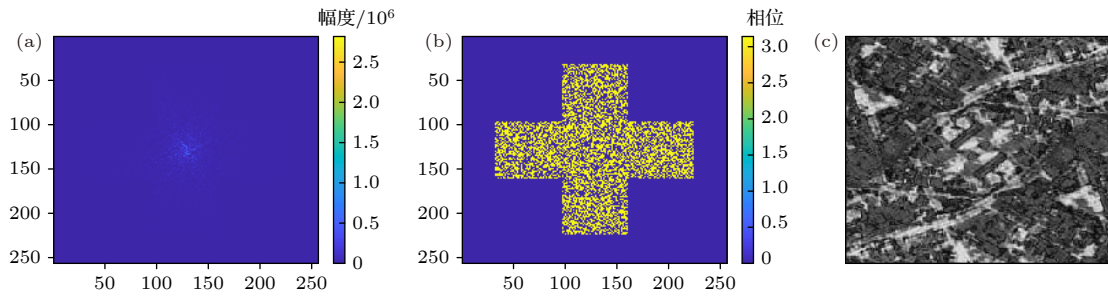


图8 稀疏面阵探测器频谱虚部重构 (a) 频谱幅度; (b) 频谱相位; (c) 图像

Fig. 8. Reconstruction of the imaginary part of the sparse plane array detector signals' spectrum: (a) Amplitude of the spectrum; (b) phase of the spectrum; (c) image.

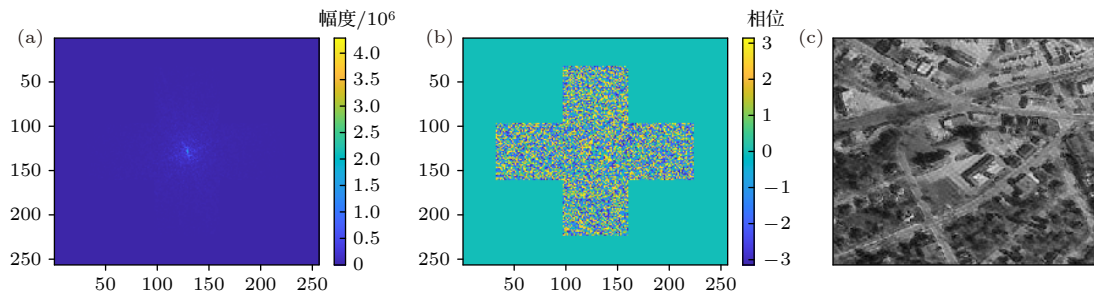


图9 稀疏面阵探测器频谱重构 (a) 频谱幅度; (b) 频谱相位; (c) 图像

Fig. 9. Reconstruction of the sparse plane array detector signals' spectrum: (a) Amplitude of the spectrum; (b) phase of the spectrum; (c) image.

256;  $\hat{s}_i$  和  $s_i$  分别表示重构复图像 (频谱) 和激光回波复图像 (频谱) 中第  $i$  个单元的值. 均方误差越小, 表示重构效果越好.

结构相似度从对比度、亮度和结构等角度评价复图像 (频谱) 的重构效果, 其表达式为

$$\text{SSIM} = \frac{[2E(S)E(\hat{S}) + C_1][2\text{cov}(S, \hat{S}) + C_2]}{[E^2(S) + E^2(\hat{S}) + C_1][D^2(S) + D^2(\hat{S}) + C_2]}, \quad (11)$$

式中,  $D(\cdot)$  表示计算方差,  $\text{cov}(\cdot)$  表示计算协方差,

$C_1$  和  $C_2$  均为常数矩阵. 结构相似度的范围为  $[0, 1]$ , 当  $\text{SSIM} = 1$  时, 两幅复图像 (频谱) 完全相同; 当  $\text{SSIM} = 0$  时, 两幅复图像 (频谱) 不相关.

面阵探测器和稀疏面阵探测器重构频谱和复图像的相干系数、均方误差和结构相似度如表1所示. 由相干系数和均方误差可见稀疏面阵探测器的频谱重构效果较好, 但由于利用傅里叶逆变换重构复图像对频谱的精确度较高, 因此稀疏面阵探测器重构复图像结构相似度明显降低, 均方误差增大.

表 1 面阵探测器和稀疏面阵探测器频谱与复图像重构效果

Table 1. Spectrum and complex image reconstruction effect of the plane array detectors and the sparse plane array detectors.

重构结果	相干系数	均方误差	结构相似度
面阵探测器重构频谱	1.00	2.51	1.00
面阵探测器重构复图像	1.00	0.01	1.00
稀疏面阵探测器重构频谱	0.96	22.14	1.00
稀疏面阵探测器重构复图像	0.96	1857.25	0.67

### 3.4 参数变化的影响分析

上述仿真和分析均基于参考激光和激光回波频谱幅度满足  $a_2(x, y) = 30\mu[a_1(x, y)]$ , 参考激光的初始相位  $\varphi_2(x, y) = 0$  的条件, 以下基于相干系数分析幅度比值  $R = \frac{a_2(x, y)}{\mu[a_1(x, y)]}$  和  $\varphi_2(x, y)$  对重构效果的影响.

图 10 为  $\varphi_2(x, y) = 0$  条件下, 不同  $R$  对应的稀疏面阵探测器重构复图像的相干系数曲线.

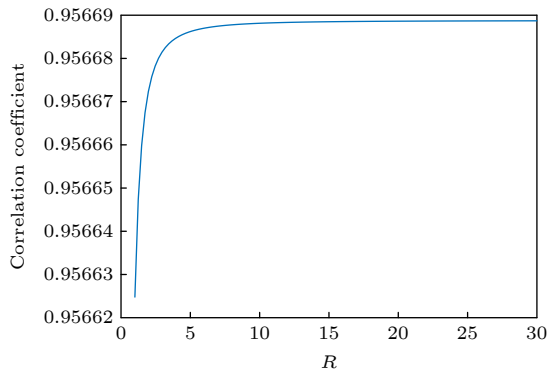


图 10  $R$  与稀疏面阵探测器重构复图像相干系数的变化曲线

Fig. 10. Change curves of the relationship between  $R$  and correlation coefficient of the reconstructed complex image of the sparse plane array detectors.

由仿真结果可知, 参考激光幅度和激光回波频谱幅度均值的比值  $R$  的增大可提升复图像的重构性能. 当  $R \rightarrow 30$  时, 相干系数的增大趋于平稳.  $R = 30$  条件虽在一定程度上牺牲了探测器的动态范围, 但能够保证获得较好的重构结果.

图 11 为  $R = 30$  条件下, 不同  $\varphi_2(x, y)$  对应稀疏面阵探测器重构复图像的相干系数曲线. 结果表明, 参考激光的初始相位对激光回波复图像的重构效果没有明显的影响.

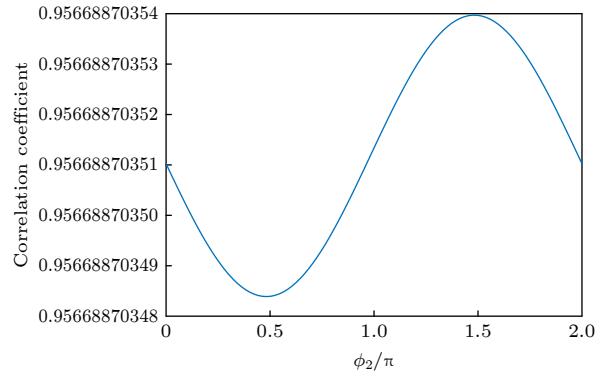


图 11  $\varphi_2(x, y)$  与稀疏面阵探测器重构复图像相干系数的变化曲线

Fig. 11. Change curves of the relationship between  $\varphi_2(x, y)$  and correlation coefficient of the reconstructed complex image of the sparse plane array detectors.

## 4 结 论

本文研究了基于直接探测器的稀疏频域采样成像方法并给出了仿真结果, 分析结果表明该方法具有一定可行性, 后续将开展验证实验.

为基于直接探测器重构复频谱, 本文方法采用时分方式对参考激光实现的空间相位调制, 这对高数据率成像造成了一定影响, 因此本文方法适用于场景变化缓慢、需求对时效性要求不高的情景. 与此同时, 该方法要求参考激光的幅度较大, 这在一定程度上降低了探测器的动态范围.

本文在复频谱重构过程中引入参考激光, 其思路 and 数字全息成像 [20,21] 有相近之处. 目前的数字全息成像采样在图像域完成, 其重构工作主要是为了恢复图像的幅度 (灰度), 对其相位的重构效果较差, 将本文方法用于数字全息成像, 不以稀疏采样减少数据量为目的时, 有可能获得比现有数字全息方法更好的复图像重构效果, 持续相关研究工作具有重要意义.

## 参考文献

- [1] Lü N G 2013 *Fourier Optics* (Second Edition) (Beijing: China Machine Press) pp297–312 (in Chinese) [吕乃光 2013 傅里叶光学 (2版) (北京: 机械工业出版社) 第297–312页]
- [2] Han L, Tian F C, Xü X, Liu W, Wang Y 2008 *J. Chongqing Univ.* **31** 426 (in Chinese) [韩亮, 田逢春, 徐鑫, 刘伟, 王宇 2008 重庆大学学报 **31** 426]
- [3] Zheng G, Horstmeier R, Yang C 2013 *Nature Photon.* **7** 739
- [4] Sun J S, Zhang Y Z, Chen Q, Zuo C 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 327 (in Chinese) [孙佳嵩, 张玉珍, 陈钱, 左超 2016 光学学报 **36** 327]
- [5] Shao X P, Su Y, Liu J P, Liu F, Li W, Xi T L 2021 *Acta Photon. Sin.* **50** 931 (in Chinese) [邵晓鹏, 苏云, 刘金鹏, 刘飞,



- 李伟, 席特立 2021 光子学报 50 931]
- [6] Zhao M, Wang X M, Zhang X H, Zhang W 2019 *Laser & Optoelectronics Progress* **56** 121 (in Chinese) [赵明, 王希明, 张晓慧, 张望 2019 激光与光电子学进展 56 121]
- [7] Xiang M, Pan A, Zhao Y, Fan X, Yao B 2021 *Opt. Lett.* **46** 29
- [8] Li D J, Zhu Y, Hu X, Yu H F, Zhou K, Zhang R N, Liu L 2020 *J. Radars* **9** 195 (in Chinese) [李道京, 朱宇, 胡烜, 于海峰, 周凯, 张润宁, 刘磊 2020 雷达学报 9 195]
- [9] Rogers C, Piggott A Y, Thomson D J, Wiser R F, Nicolaescu R 2021 *Nature* **590** 256
- [10] Li D J, Zhou K, Cui A J, Qiao M, Wu S M, Wang Y F, Yao Y, Wu J, Gao J H 2021 *Laser & Optoelectronics Progress* **58** 342 (in Chinese) [李道京, 周凯, 崔岸婧, 乔明, 吴淑梅, 王焯非, 姚园, 吴疆, 高敬涵 2021 激光与光电子学进展 58 342]
- [11] Li Q, Ding S H, Li Y D, Xue K, Wang Q 2012 *Laser & Optoelectronics Progress* **49** 46 (in Chinese) [李琦, 丁胜晖, 李运达, 薛凯, 王骥 2012 激光与光电子学进展 49 46]
- [12] Ma L H, Wang H, Jin H Z, Li Y 2012 *Chinese J of Lasers* **39** 215 (in Chinese) [马利红, 王辉, 金洪震, 李勇 2012 中国激光 39 215]
- [13] Bao Z, Xing M D, Wang T 2005 *Radar Imaging Technology* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp30–44 (in Chinese) [保铮, 邢孟道, 王彤 2005 雷达成像技术 (北京: 电子工业出版社) pp30–44]
- [14] Dai Y J 2002 *Principle of Lidar* (Beijing: National Defense Industry Press) pp256–260 (in Chinese) [戴永江 2002 激光雷达原理 (北京: 国防工业出版社) pp256–260]
- [15] Xie Z L, Ma H T, Ren G, Qi B, Ding K 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 102 (in Chinese) [谢宗良, 马浩统, 任戈, 亓波, 丁科 2015 光学学报 35 102]
- [16] Tang W, Guo Y, Yi W, Yang J, Zhu J, Wang W, Li X 2019 *Opt. Commun.* **443** 144
- [17] Li L C 2015 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [李烈辰 2015 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [18] Rousseau D, Delahaies A, Chapeau-Blondeau F 2009 *IEEE Signal Processing Letters* **17** 36
- [19] Tian H, Li D J 2017 *IET Radar, Sonar & Navigation* **11** 1886
- [20] Zhang W H, Cao L C, Jin G F 2019 *Infrared and Laser Engineering* **48** 104 (in Chinese) [张文辉, 曹良才, 金国藩 2019 红外与激光工程 48 104]
- [21] Zhang M L, Gao P, Wen K, Zhuo K Q, Wang Y, Liu L X, Min J W, Yao B L 2021 *Acta Photonica Sinica* **50** 9 (in Chinese) [张美玲, 郜鹏, 温凯, 卓可群, 王阳, 刘立新, 闵俊伟, 姚保利 2021 光子学报 50 9]

## Sparse sampling in frequency domain and laser imaging<sup>\*</sup>

Cui An-Jing<sup>1)2)</sup> Li Dao-Jing<sup>1)†</sup> Wu Jiang<sup>1)2)</sup> Zhou Kai<sup>1)2)</sup> Gao Jing-Han<sup>1)2)</sup>

1) (Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

(Received 30 July 2021; revised manuscript received 12 February 2022)

### Abstract

The monochromaticity of the laser and the characteristics of the natural image's spectrum, including sparsity and concentrating in the low frequency range, make it possible to sample the image spectrum sparsely. Based on small-scale laser detectors and the introduced laser reference signals, a method of laser imaging with sparse sampling in frequency domain is proposed in this paper. The principle of frequency sparse sampling laser imaging and the imaging system structure are introduced. The simulation results of spectrum and complex images reconstructed are given. Both the effects of the signals' parameters, such as the ratio of the reference laser signal amplitude to the laser echo spectrum amplitude and the initial phase of the laser reference signal, on reconstruction results are investigated. The reconstruction results are evaluated by correlation coefficient, mean square error (MSE), and structural similarity index (SSIM). For the strong correlation between phase and amplitude of the laser echo complex image, the amplitude image and the phase image are both set to be  $256 \times 256$  diagram. The sparse laser detector plane array consists of  $564 \times 64$  frequency domain laser detector arrays, which form a cross and make a sparsity rate of 31.25%(5/16). The simulation results show that the correlation coefficient, MSE and SSIM of the spectrum reconstructed are 0.96, 22.14, 1.00 and those of the complex image reconstructed are 0.96, 1857.25 and 0.67 respectively. The simulation results indicate that the method proposed is effective. However, the method requires the laser reference signal amplitude to be about 30 times the mean value of the laser echo spectrum amplitude, which reduces the dynamic range of the detectors. The initial phase of the laser reference signal has no obvious effect on the reconstruction results.

**Keywords:** laser imaging, sparse sampling in the frequency domain, laser detector, image reconstruction

**PACS:** 87.63.lt, 42.79.Pw, 42.60.-v, 42.62.-b

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211408

<sup>\*</sup> Project supported by the Key Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No. E03701010F).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn