

## 激光相干场成像散斑噪声复合去噪方法

程志远 李治国 折文集 夏爱利

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

Cheng Zhi-Yuan Li Zhi-Guo She Wen-Ji Xia Ai-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 054206 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181578

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181578>

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

基于激光散斑成像的零件表面粗糙度建模

Surface roughness modeling based on laser speckle imaging

物理学报. 2015, 64(23): 234203 <https://doi.org/10.7498/aps.64.234203>

混沌信号自适应协同滤波去噪

An adaptive denoising algorithm for chaotic signals based on collaborative filtering

物理学报. 2018, 67(6): 60501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172470>

等离子体中散斑光场的传输特性

Propagation characteristics of speckle field in plasma

物理学报. 2018, 67(8): 85201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171795>

针对多散斑图的差分压缩鬼成像方案研究

Multiple speckle patterns differential compressive ghost imaging

物理学报. 2015, 64(1): 14202 <https://doi.org/10.7498/aps.64.014202>

集合背景误差方差中小波阈值去噪方法研究及试验

Investigation and experiments of wavelet thresholding in ensemble-based background error variance

物理学报. 2017, 66(2): 20505 <https://doi.org/10.7498/aps.66.020505>

混沌信号的压缩感知去噪

Chaotic signal denoising in a compressed sensing perspective

物理学报. 2015, 64(16): 160502 <https://doi.org/10.7498/aps.64.160502>

## 激光相干场成像散斑噪声复合去噪方法\*

程志远<sup>†</sup> 李治国 折文集 夏爱利

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2018年8月22日收到; 2018年11月17日收到修改稿)

噪声是影响激光相干场高分辨成像系统像质的重要因素, 激光相干场成像系统既受背景光加性噪声影响, 又受激光乘性散斑噪声影响. 为解决激光相干场成像系统受激光乘性散斑噪声和背景光加性噪声叠加引起的成像像质退化效应问题, 从噪声抑制角度提高激光相干场系统高分辨成像像质, 研究建立了激光散斑乘性噪声和背景光加性噪声对大气下行链路激光回波场信号影响干扰模型, 并基于该模型提出了一种基于同态滤波和稀疏基追踪级联复合去噪算法. 首先基于同态滤波理论将激光乘性散斑噪声转化为加性噪声, 再由高通滤波器滤除散斑噪声, 最后采用基追踪稀疏理论方法抑制背景光等加性噪声对像质的影响. 研究表明, 较现有单一去噪方法, 该级联复合去噪方法可一次性消除激光乘性散斑噪声和背景加性噪声两种不同性质的噪声, 有效改善了激光相干场成像质量.

**关键词:** 激光散斑噪声, 背景光噪声, 同态滤波, 稀疏去噪

**PACS:** 42.25.Kb, 42.30.Kq

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181578

## 1 引言

激光相干场成像系统由发射和接收单元组成, 发射单元发射多束激光形成干涉场扫描目标, 目标反射的回波信号经接收解调处理后, 傅里叶逆变换重构目标高分辨图像. 该高分辨计算成像方法通过拉长激光干涉基线长度来提高分辨率, 是一种新型主动式高分辨成像技术, 可拓展应用于空间微弱目标探测成像等领域.

噪声是影响激光相干场成像像质的重要因素之一, 噪声来源主要有: 与激光回波信号相关的乘性散斑噪声, 与激光回波信号无关的加性背景噪声和探测器噪声等. 由于加性背景噪声和乘性散斑噪声产生机理不同, 两类噪声的抑制方法也不尽相同. 目前抑制激光散斑噪声的方法主要有: 第一类基于信号处理的散斑噪声分析去噪方法, 包括自适应滤波算法<sup>[1]</sup>、统计滤波方法<sup>[2]</sup>、光谱分解去噪方

法<sup>[3]</sup>、边缘检测去噪方法<sup>[4]</sup>、灰度分布散斑噪声定位分析方法<sup>[5]</sup>、散斑噪声对波前校正像质影响分析<sup>[6]</sup>、稳健性主成分分析方法消除散斑噪声<sup>[7]</sup>、多角度采样平均法<sup>[8]</sup>和同态滤波方法<sup>[9]</sup>; 第二类基于去相干原理的散斑噪声抑制方法, 该方法采用旋转毛玻璃, 从减小激光束相干性角度, 抑制散斑噪声. 综上所述, 第一类基于信号处理的散斑去噪方法较多且各有特色, 主要从图像信号输出端被动抑制散斑噪声; 第二类物理去相干主动抑制散斑方法<sup>[10]</sup>, 主要从散斑噪声产生的前端, 主动抑制散斑噪声. 另一类背景光加性噪声抑制主要有空域滤波法和稀疏变换域去噪方法, 空域滤波利用信号空域统计特性去噪, 具有简单、算法复杂度低的特点<sup>[11]</sup>; 稀疏变换域去噪主要包括: 稀疏变分法<sup>[12]</sup>、噪声水平估计法<sup>[13-15]</sup>、图像块分组稀疏编码法<sup>[16]</sup>和字典学习稀疏去噪法<sup>[17-19]</sup>, 稀疏去噪方法主要利用信号与噪声稀疏分解的不同特性进行去噪.

综上所述, 以上去噪方法各有优缺点, 适用场

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61875257) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2017JM6035) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [czy@opt.ac.cn](mailto:czy@opt.ac.cn)

合不尽相同. 针对激光相干场成像系统像质的影响, 目前已进行了以下理论和实验研究: 散斑噪声、光子噪声、大气湍流扰动、激光光强扰动和发射孔径阵列等对像质影响分析和像质提升研究<sup>[20-23]</sup>.

受激光相干场成像的具体成像机理和特点决定, 该系统既存在激光乘性散斑噪声, 又存在背景加性噪声等, 现有单一散斑去噪算法和去加性噪声算法, 都无法很好地抑制激光相干场成像系统中同时存在的两种不同类型噪声, 存在去噪后像质提升效果有限的问题, 目前国内外尚无既可消除激光乘性散斑噪声, 又可消除背景加性噪声的有效去噪方法.

与现有去噪方法不同的是, 本研究针对激光相干场成像的激光回波信号特点, 提出一种基于同态滤波和信号稀疏表示的复合去噪方法, 既可一次性去除背景光、探测器加性噪声, 又可抑制乘性激光散斑噪声, 目的在于抑制散斑噪声和加性噪声对像质的影响, 有效提高激光相干场系统成像像质.

## 2 激光散斑噪声对像质影响模型

### 2.1 散斑噪声成因和影响分析

激光相干场成像系统组成原理如图 1 所示, 系统由激光发射阵列和激光回波接收分系统两部分组成, 发射阵列发射调制后的多束激光形成相干场, 照射远程目标, 激光干涉场携带目标频谱信息由接收系统解调处理重建高分辨图像, 同时经目标反射的部分激光光子波, 相互干涉产生激光相干散斑噪声. 激光散斑噪声在常规的激光主动成像系统会直接影响成像质量, 与常规的激光主动成像不同, 激光散斑噪声不直接影响相干场成像像质, 而是首先影响激光回波场信号, 并经信号解调、频谱重建

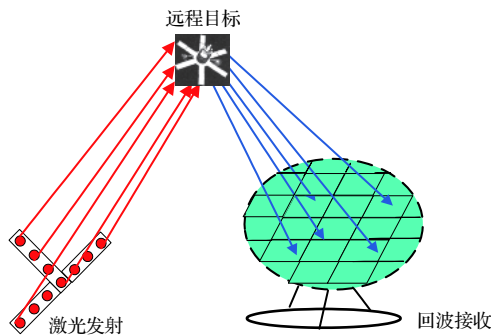


图 1 激光相干场成像原理示意图

Fig. 1. Schematic diagram of laser coherent field imaging.

后, 再由逆傅里叶变换成像, 间接影响系统成像质量.

散斑噪声经逆傅里叶重构成像后, 对重构图像的影响表现为图像信对比度降低, 图像背景混杂激光暗斑和亮斑, 影响图像清晰度. 激光乘性散斑噪声的产生机理与背景加性噪声有本质的不同, 现有常规单一去噪方法不再适合抑制激光相干场系统中两种不同性质的噪声. 因此针对激光相干场成像既存在加性噪声又存在激光乘性散斑噪声的问题, 为提升激光相干场成像像质, 需研究对应的去噪方法.

### 2.2 激光相干场成像散斑噪声影响建模

本节推导建立乘性散斑噪声和背景加性噪声对激光回波场信号影响的数学模型.

#### 2.2.1 激光回波信号光场模型

激光相干成像与干涉成像原理相通, 基于干涉成像信噪比计算理论<sup>[7]</sup>, 可得到激光相干场成像回波光场信号, 则回波光场光强可表示为

$$I = |E|^2 = A_s^2 + A_n^2 + 2A_s A_n \times \cos(\varphi_s - \phi) = I_s + I_n + I_{sn}, \quad (1)$$

式中第一项  $I_s = A_s^2$  是两束激光束的干涉光场光强, 第二项  $I_n = A_n^2$  是背景光等随机噪声的光强, 第三项  $I_{sn} = 2A_s A_n \cos(\varphi_s - \phi)$  是激光干涉光场和噪声光场干涉产生的寄生光场光强, 该光场与散斑噪声相关.

由光场统计特性可得, (1) 式中干涉光场光强服从以下概率分布:

$$P_1(I) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I + A_s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{A_s \sqrt{I}}{\sigma^2}\right), \quad (2)$$

(2) 式中  $2\sigma^2$  是光场噪声强度.

$$I(x, y, t) = I_s(x, y, t) + I_n(x, y, t) + I_{sn}(x, y, t, s), \quad (3)$$

(3) 式中第一项激光回波信号光强和第二项加性噪声信号光强与空间位置  $x, y$  和时间变量  $t$  相关; 第三项噪声项不但与空间位置和时间相关外, 还与激光回波光场信号  $s$  相关. 此式表明激光散斑噪声与背景加性噪声不同, 是一种与回波信号相关的乘性噪声.

#### 2.2.2 受噪声干扰的激光下行链路回波噪声模型

激光回波场信号可看作激光光强函数  $I(x, y, t)$  与目标强度反射率函数  $O(x, y)$  的卷积, 因此叠

加了激光散斑噪声和背景光噪声的相干场回波信号  $S'(t)$  可表示为:

$$\begin{aligned}
 S'(t) &= \iint I(x, y, t) O(x, y) dx dy \\
 &= \iint (I_s + I_n + I_{sn}) O(x, y) dx dy, \\
 S'(t) &= S(t) + \Delta n(t) + \Delta sn(t), \quad (4)
 \end{aligned}$$

简写为

$$S'(t) = S(t) + \Delta n(t) + \Delta sn(t),$$

$S'(t)$  表示受散斑噪声干扰的激光回波信号;  $S(t)$  表示不受散斑和背景噪声干扰的激光回波信号;  $\Delta n(t)$  表示背景光和探测器等加性随机噪声;  $\Delta sn(t)$  为激光乘性散斑噪声.

激光回波能量信号经大面积探测器汇聚处理后, 还会受到探测器噪声  $\Delta c(t)$  的影响, 本研究假设激光散斑噪声、探测器噪声、背景噪声两两相互独立, 则叠加探测器噪声  $\Delta c(t)$  后的激光回波信号可表示为

$$S''(t) = S(t) + \Delta n(t) + \Delta sn(t) + \Delta c(t). \quad (5)$$

基于上述建模分析, 激光相干场成像去噪问题可抽象为最优化估计问题, 受激光散斑噪声、背景噪声、探测器噪声干扰的激光回波信号  $S''(t)$ , 依据一定的数学准则, 寻求理想激光回波信号  $S(t)$  的

最佳估计. 同常规光学成像不同的是, 在激光相干场成像系统中, 不但需要去除常规光学成像的背景光等加性噪声, 还需要抑制激光相干场成像系统中激光乘性散斑噪声对成像像质的影响.

### 3 级联复合去噪方法

现有激光相干场去噪方法, 没有针对激光相干场成像的特点对噪声进行激光散斑乘性噪声和背景加性噪声分类研究, 本文在现有激光相干场去噪研究基础上, 分别针对激光相干场成像系统中背景等加性噪声和乘性散斑噪声的特点, 采用基追踪稀疏去噪结合同态滤波复合去噪方法, 抑制噪声, 提升成像像质.

激光相干场成像信号去噪信息流如图 2 所示, 回波接收系统先对激光回波场信号进行解调处理, 再基于同态滤波理论方法对激光回波场信号进行乘性散斑噪声去噪处理, 先把乘性散斑噪声取对数转化为加性噪声, 再设计高通滤波器, 滤除散斑噪声, 接着进行相位闭合处理抑制湍流随机扰动, 然后进行频谱重建, 由去噪后的频谱分量重建图像, 最后对图像进行去背景加性噪声处理.

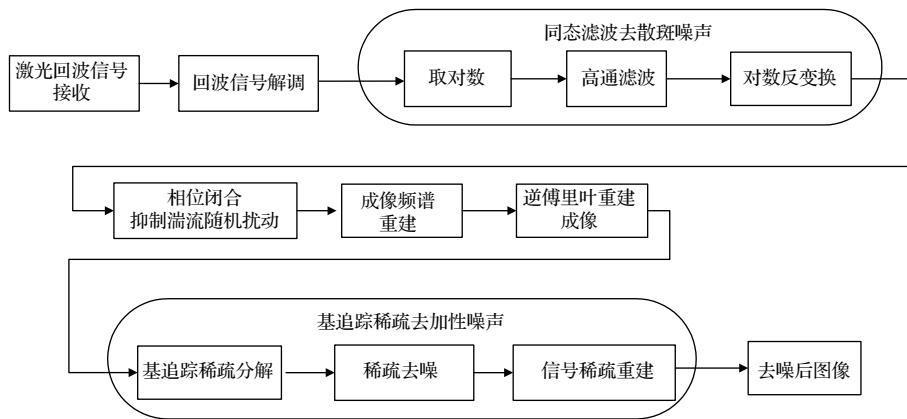


图 2 激光相干场成像信号去噪信息流程图

Fig. 2. Flow chart of denoising information for laser coherent field imaging signal.

具体流程如下.

#### 1) 激光回波信号接收解调

首先对激光回波信号进行解调处理, 设采样周期为  $T$ , 采样点数为  $N$ , 信号频差  $\Delta\omega_{ij}$ , 当下述条件满足时:  $N\Delta\omega_{ij}T = 2n\pi$ , 激光回波信号  $S(t)$  离散采样简化处理后, 可得到三光束两两拍频后的三组拍频解调信号分量  $P_{ij}$ :

$$\begin{aligned}
 P_{ij} &= \sum_{k=0}^{N-1} M(kT) e^{i\Delta\omega_{ij}kT} = \\
 &= N A_i A_j O_{ij} e^{i\Delta\omega_{ij}kT}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

其中  $M(kT)$  为一个采样周期内离散采样数据;  $O_{ij}$  为频谱分量,  $A_i$  和  $A_j$  分别为光束  $i$  和光束  $j$  光强振幅,  $k$  为激光回波信号离散采样点序号,  $N$  为总采样点数.



2) 同态滤波抑制激光乘性散斑噪声

基于同态滤波理论方法去除乘性散斑噪声: 将激光回波解调信号  $P_{ij}$ , 先取对数  $\log$ , 把乘性散斑噪声转换为加性噪声, 再由高通滤波器抑制已转化为加性噪声的低频散斑噪声, 然后将滤除散斑噪声的信号进行指数运算  $\exp$ , 得到滤除乘性散斑噪声后的激光回波场信号.

激光回波场信号中含有激光散斑噪声和目标细节特征频谱信息, 激光散斑噪声属于低频信号, 而目标轮廓等细节特征属于高频信号, 基于激光散斑噪声与目标频谱细节特征信息频谱谱段的差异, 设计高通滤波器抑制激光散斑噪声对相干场成像质的影响.

高通滤波器模型:

$$H(u, v) = \begin{cases} 0, & D(u, v) \leq D_0, \\ 1, & D(u, v) \geq D_0, \end{cases} \quad (7)$$

频域信号二维坐标参数分别用  $u, v$  表示,  $D_0$  为巴特沃斯高通滤波器截止频率,  $D(u, v)$  为频率点  $(u, v)$  与频域中心的距离.

巴特沃斯高通滤波器模型:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [D_0/D(u, v)]^{2n}}, \quad (8)$$

其中  $D_0$  为巴特沃斯高通滤波器截止频率;  $n$  为滤波器阶数.

由上文所述的巴特沃斯高通滤波器对取对数后的激光回波解调信号进行滤波抑制乘性散斑噪声, 去噪后的信号再进行对数反变换, 最后得到滤除乘性散斑噪声的激光回波信号.

3) 大气湍流相位扰动抑制与频谱重建

激光相干场成像系统中发射的激光束会受到大气湍流扰动的影响, 激光回波光场相位发生畸变, 影响成像质量. 为消除大气湍流相位畸变对像质的影响, 通常采用三光束或多光束相位闭合技术, 消除湍流随机相位扰动. 相位闭合原理如图 3 所示, 以三光束相位闭合为例, 三组回波解调信号形成闭环, 经相位闭环计算后, 可得到各阶相位闭合系数  $R_{12n}$ , 再由相位闭合系数和频谱分量  $O_{12}$ ,  $O_{2n}$  进行频谱迭代重建处理, 由低到高得到各阶频谱分量  $O_{1n}$ :

$$O_{1n} = (O_{12} * O_{2n}) / R_{12n}. \quad (9)$$

4) 图像逆傅里叶重建

最后由各阶频谱分量  $O_{1n}$  经逆傅里叶变换, 得到滤除激光散斑噪声的图像.

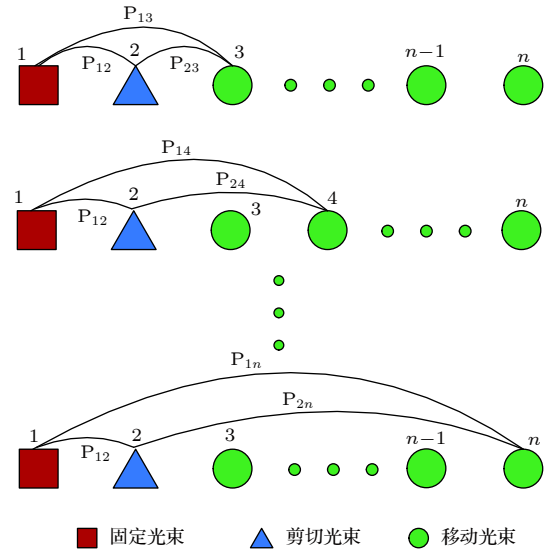


图 3 相位闭合示意图

Fig. 3. Schematic diagram of phase closure technique.

5) 稀疏基追踪去加性噪声

重构后的图像信号经拉格朗日基追踪稀疏去噪方法抑制背景光、探测器等加性噪声, 得到去除加性噪声后的图像信号  $f$ .

拉格朗日追踪松弛模型可表示为

$$\hat{a} = \arg \min \frac{1}{2} \|f - \Phi^* a\|^2 + T \|a\|_1, \quad (10)$$

其中  $a$  为分解系数,  $T$  为拉格朗日系数,  $\Phi$  为信号基.

采用梯度下降法求解拉格朗日追踪松弛模型中  $a$  的  $L_1$  范数, 计算求解方法如下:

- 1) 取  $k = 0$ , 选取  $a_0$  初始值, 置中间变量  $b = \Phi f$ , 并计算其值;
- 2) 计算梯度:  $\bar{a}_k = a_k + \gamma (b - \Phi \Phi^* a_k)$ ,  $\gamma$  为松弛参数, 且  $\gamma$  取值范围为:  $\gamma < 2 [(\Phi \Phi^*)_s]^{-1}$ ;
- 3) 取阈值:  $\bar{a}_k = a_k + \gamma (b - \Phi \Phi^* a_k)$ ;
- 4) 迭代停止: 当  $\|a_k - a_{k+1}\|$  小于设定的阈值时, 则停止迭代; 否则令  $k = k + 1$  并返回第 2 步.

4 实验与结果分析

4.1 仿真实验结果

为验证复合去噪算法效果, 激光回波信号中添加背景光等加性噪声和乘性散斑噪声, 分别对比直接重建图像、稀疏去噪图像、同态滤波去噪图像、同态与稀疏复合去噪图像的斯特列尔比、图像对比度、平均梯度 3 个指标, 定量化比较各方法去噪效果. 表 1 计算得到了各方法去噪后图像的对比度、

成像斯特列尔比、平均梯度. 斯特列尔比主要用于表征两幅图像强度分布的相似度, 百分比越大说明两幅图像越接近. 图像对比度主要用来评价目标和背景灰度层次反差效果, 通常对比度越大, 图像越清晰. 平均梯度指图像目标轮廓附近灰度变化率, 平均梯度越大, 图像的相对清晰度越高. 以上 3 个指标数值越大, 图像去噪效果越好.

表 1 不同去噪方法指标对比表

Table 1. Comparison indicators table of different de-noising methods.

对比项	直接重建法	稀疏去噪法	同态滤波法	复合去噪法
斯特列尔比	46.3%	50.1%	52.7%	63.5%
图像对比度	0.25	0.27	0.42	0.46
平均梯度	5.98	6.11	6.28	7.13

图 4 为不同去噪方法去噪后图像效果对比图, 由图 4(c) 和 (d) 比较可得, 图 4(c) 中图像背景分布有明显暗斑和亮斑噪声, 而图 4(d) 暗斑和亮斑噪声图案较少. 图 4(e) 为采用级联复合滤波去噪得到的图像, 图像清晰、轮廓分明、背景灰度均匀, 与稀疏去噪和同态滤波两种单一去噪方法相比, 效果最好.

由表 1 计算结果可知, 本文复合去噪后的图像对比度、斯特列尔比、平均梯度均大于其他两种去

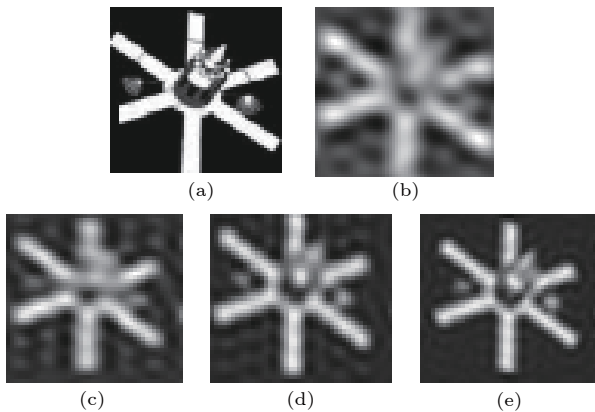


图 4 不同算法去噪效果图 (a) 原始模板图像; (b) 由图像算法直接重构未去噪的图像; (c) 由稀疏去噪算法去加性噪声后得到的图像; (d) 由同态滤波去乘性散斑噪声后得到的图像; (e) 由同态滤波和稀疏复合去噪后得到的图像  
Fig. 4. Denoising effect diagram of different algorithms: (a) Original template image; (b) direct reconstruction of undenoised images by image algorithms; (c) image obtained by sparse denoising algorithm after additive noise removal; (d) image obtained by removing multiplicative speckle noise by homomorphic filtering; (e) image obtained by homomorphic filtering and sparse combined denoising.

噪方法, 衡量成像像质的斯特列尔比分别比单独稀疏去噪和同态滤波去噪提高 13.4% 和 10.8%, 图像对比度比稀疏去噪和同态滤波去噪分别提高 0.19 和 0.04, 平均梯度分别比稀疏去噪和同态滤波去噪提高 1.02 和 0.85. 复合级联去噪方法与单独稀疏去噪和同态滤波去噪相比, 较好地抑制了散斑噪声和加性噪声. 而该方法同直接重构图像相比, 斯特列尔比、图像对比度、平均梯度分别提高 17.2%, 0.21, 1.15. 本文所提复合去噪方法去噪效果优于现有单一去噪方法, 该方法较好地抑制了噪声, 改善了像质.

## 4.2 室外实验结果

为验证本文所提复合去噪方法的有效性, 对室外真实目标进行成像去噪实验, 并以真实目标图像为标准模板, 分别计算直接重构图像和复合去噪后图像的斯特列尔比、对比度、平均梯度, 以定量化评估本文所提复合去噪方法的去噪效果. 图 5(a), (b), (c) 分别为室外成像真实目标、直接重构未去噪图像、复合去噪后的图像.

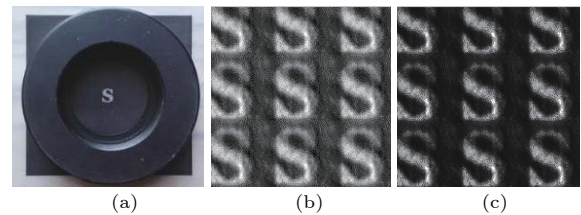


图 5 室外成像去噪实验效果对比图 (a) 室外成像目标; (b) 直接重构成像; (c) 去噪后重构成像  
Fig. 5. Comparison of outdoor imaging de-noising experiment: (a) Outdoor imaging target; (b) direct reconstruction imaging; (c) reconstruction imaging after de-noising.

从图 5 可知, 采用本文所提算法去噪后的图像背景均匀、图像像质和图像对比度与图 5(b) 直接重构图像相比, 都有较明显的改善和提升. 该复合去噪方法有效抑制了激光散斑噪声和背景噪声, 在去噪改善像质方面有一定效果, 去噪后图像斯特列尔和图像对比度分别提升 3.6% 和 0.18, 平均梯度较直接重建方法提高了 5.33.

## 5 结论

不同于常规光学成像系统只存在背景光等加性噪声, 激光相干场主动成像系统像质既受探测器

噪声和背景光加性噪声影响, 又受激光乘性散斑噪声影响. 为解决现有去噪方法无法同时有效抑制激光乘性散斑噪声和加性背景噪声两种不同性质噪声问题, 本研究提出基于同态滤波和稀疏变换级联复合去噪方法, 既可一次性抑制激光乘性散斑噪声, 又可抑制背景加性噪声对像质的影响, 提高激光相干场成像质量, 该方法对于改善激光相干场成像像质具有借鉴意义.

## 参考文献

- [1] Zhu M M, Shi D F, Hu S S, Wang Y J 2017 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **34** 145 (in Chinese) [朱曼曼, 时东锋, 胡顺星, 王英俭 2017 量子电子学报 **34** 145]
- [2] Deng H, Zhang R Z, Sun N C 2016 *Journal of Applied Optics* **36** 0129002 (in Chinese) [邓慧, 张蓉竹, 孙年春 2016 应用光学 **36** 0129002]
- [3] Chen Y, Li Z L, Nan N, Bu Y, Wang X, Pan L H, Wang X C 2015 *Acta Optic. Sin.* **38** 0811004 (in Chinese) [陈艳, 李中梁, 南楠, 步扬, 王瑄, 潘柳华, 王向朝 2015 光学学报 **38** 0811004]
- [4] Wu Y M, Duan H Y, Wen Y F, Cheng H B, Wang T 2018 *Imaging Science and Photochemistry* **36** 187 (in Chinese) [吴育民, 段海燕, 文永富, 程灏波, 王谭 2018 影像科学与光化学 **36** 187]
- [5] Yang P C, Liu Y, Zhu X D, Xu G S, Xiao Y 2017 *Journal of Applied Optics* **38** 221 (in Chinese) [杨鹏程, 刘洋, 朱新栋, 胥光中, 肖渊 2017 应用光学 **38** 221]
- [6] Chen B, Yang J, Yang X, Li X Y 2015 *Chinese Journal of Lasers* **42** 1012002 (in Chinese) [陈波, 杨靖, 杨旭, 李小阳 2015 中国激光 **42** 1012002]
- [7] Yuan Z L, Chen J B, Huang W Y, Wei B, Tang Z L 2018 *Acta Optica Sinica* **38** 0511002 (in Chinese) [袁治灵, 陈俊波, 黄伟源, 魏波, 唐志列 2018 光学学报 **38** 0511002]
- [8] Wang D Y, Wang Y X, Guo S, Rong L, Zhang Y Z 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 154205 (in Chinese) [王大勇, 王云新, 郭莎, 戎路, 张亦卓 2014 物理学报 **63** 154205]
- [9] Tian X P, Cheng X, Wu C M, Liu Y B 2015 *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*. **20** 51 (in Chinese) [田小平, 程新, 吴成茂, 刘一博 2015 西安邮电大学学报 **20** 51]
- [10] Kuechel M *US Patent* 6 804 011 [2004-10-12]
- [11] Yu H C, Gao J L, Li A T 2016 *Opt. Lett.* **41** 994
- [12] Zhang Y Y, Chen S T, Ge J X, Wan F Y, Mei Y, Zhou X Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 129501 (in Chinese) [张艳艳, 陈苏婷, 葛俊祥, 万发雨, 梅永, 周晓彦 2017 物理学报 **66** 129501]
- [13] Chen Y Y, Jiang G Y, Shao H, Jian H, Yu M 2018 *Opto-Electronic Engineering* **45** 180083 (in Chinese) [陈晔曜, 蒋刚毅, 邵华, 姜浩, 郁梅 2018 光电工程 **45** 180083]
- [14] Chiang J C, Kao P H, Chen Y S, et al. 2017 *Circ. Syst. Signal Pr.* **36** 2786
- [15] Zhang K, Zuo W, Chen Y, Meng D, Zhang L 2017 *IEEE Trans. Image Process.* **26** 3142
- [16] Hao H X, Wu L D, Song X R 2018 *Chinese Journal of Computers* **41** 1 (in Chinese) [郝红星, 吴玲达, 宋晓瑞 2018 计算机学报 **41** 1]
- [17] Shen C, Zhang M 2018 *Journal of Detection & Control* **40** 128 (in Chinese) [沈晨, 张旻 2018 探测与控制学报 **40** 128]
- [18] Zhan S, Wang J, Yang F M, Fang Q 2015 *Acta Electronic Sinica* **43** 523 (in Chinese) [詹曙, 王俊, 杨福猛, 方琪 2015 电子学报 **43** 523]
- [19] Mairal J, Bach F, Ponce J 2012 *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **34** 791
- [20] Cheng Z Y, Ma C W, Luo X J, Zhang Y, Zhu X P, Xia A L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124203 (in Chinese) [程志远, 马彩文, 罗秀娟, 张羽, 朱香平, 夏爱利 2015 物理学报 **64** 124203]
- [21] Cheng Z Y, Ma C W, Ma Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 244202 (in Chinese) [程志远, 马彩文, 马青 2017 物理学报 **66** 244202]
- [22] Rhodes W T 2012 *Appl. Opt.* **51** A11
- [23] Cheng Z Y 2015 *Ph.D. Dissertation* (Xi'an: Chinese Academy Sciences University) (in Chinese) [程志远 2015 博士学位论文 (西安: 中国科学院大学)]

# Compound denoising method of laser speckle noise in laser inherent field imaging\*

Cheng Zhi-Yuan<sup>†</sup> Li Zhi-Guo She Wen-Ji Xia Ai-Li

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

( Received 22 August 2018; revised manuscript received 17 November 2018 )

## Abstract

Noise is an important factor affecting the image quality of laser coherent field high resolution imaging system. And there exists not only background light additive noise but also laser multiplicative speckle noise in a laser coherent field imaging system. Both of the above noise affect the imaging quality of laser coherent field system. In order to improve the imaging quality from the perspective of noise suppression and settle the imaging quality degradation problem of laser multiplicative speckle noise and background additive noise in the laser coherent field imaging system, the model for the influence of multiplicative speckle noise and background additive noise on laser echo field demodulated signal is established in atmospheric downlink. Then, based on the model, a novel homomorphic filter and sparse matrix trace cascade compound de-noising algorithm is put forward. Firstly, based on the homomorphic filtering theory, the laser multiplicative speckle noise in the laser echo demodulated signal is converted into the additive noise by logarithmic transformation. Then the low-frequency laser multiplicative speckle noise is filtered by the high-pass filter, and the high-frequency demodulated signal is retained. The logarithmic inverse transform is used to obtain the laser echo demodulation signal after the multiplicative speckle noise has been filtered out. Next, the phase random disturbance of atmosphere in laser echo demodulated signal is suppressed by phase closure technology and the imaging spectrum component is reconstructed by the spectrum iterative reconstruction method. Then the high resolution image is obtained by spectrum component inverse Fourier transform. Finally, the effect of background additive noise on the image quality is suppressed by the sparse base tracking theory. The simulated and outdoor experiment result are used to verify the denoising effect and image quality enhancement effect of the composite de-noising method. Compared with the existing single denoising method, the composite denoising method is shown to be able to effectively eliminate laser multiplicative speckle noise and background additive noise at one time. The proposed method can improve image contrast and promote the Strehl ratio of imaging quality in a coherent imaging system. It provides a theoretical basis for improving imaging quality and denosing laser multiplicative speckle noise and background additive noise in coherent field imaging system.

**Keywords:** laser speckle noise, background light noise, homomorphic filter, sparse denoising

**PACS:** 42.25.Kb, 42.30.Kq

**DOI:** [10.7498/aps.68.20181578](https://doi.org/10.7498/aps.68.20181578)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61875257) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2017JM6035).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [czy@opt.ac.cn](mailto:czy@opt.ac.cn)