



·激光的热和力学效应·

时空调制型干涉成像光谱仪的强光干扰效应仿真研究

孟凡欣^{1,2,3}, 邢中阳^{1,2,3}, 许中杰^{1,2,3}, 程湘爱^{1,2,3}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 长沙 410073;
3. 高能激光技术湖南省重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 干涉成像光谱技术是利用光的干涉原理获取目标光谱信息的一种成像技术。为研究其在强光下的干扰效果和机理,以大孔径静态成像光谱仪为典型对象,开展了相关仿真实验研究。以实际地物的图像和光谱信息为对象,仿真生成了原始干涉成像图案,并模拟 830 nm 单波长激光和超连续谱激光两种干扰源,分别研究不同辐照强度下的典型干扰效果,分析时假设光谱角大于 30°时原始光谱信息丢失。基于本文的仿真模型,得到的相关结果表明,在 830 nm 的单波长激光干扰情况下,当干扰与目标成像峰值之比大于 0.2:1 时原始光谱信息无法正确复原(光谱角大于 30°),但模拟加入 830 nm 滤光片后,干扰效果被有效滤除。在超连续谱激光干扰情况下,不考虑饱和阈值时光谱角数值最终稳定在 21°;考虑探测器饱和阈值为目标成像强度峰值 3 倍时,干扰与目标成像峰值之比大于 2.1:1 时,原始光谱信息便无法分辨。该研究可能为同类型光谱仪的激光辐照效应和损伤机理的后续研究,以及光谱成像系统的激光防护和性能优化提供参考。

关键词: 光谱成像技术; 大孔径静态干涉成像; 光谱复原; 激光干扰; 傅里叶变换光谱学
中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202234.210342

Simulation study of strong light interference effect in temporally and spatially modulated Fourier transform imaging spectrometer

Meng Fanxin^{1,2,3}, Xing Zhongyang^{1,2,3}, Xu Zhongjie^{1,2,3}, Cheng Xiangai^{1,2,3}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073;
2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073;
3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073)

Abstract: This paper presents the computational studies on the effect and mechanism of strong light interference in the large aperture static interference imaging spectrometer. First, we generated images with simplified ground targets and computed the corresponding original interference imaging pattern. Then, we simulated a 830 nm single-wavelength laser and a super continuum laser respectively, to analyze the typical interference effects. During the process, it was assumed that the original spectral information could be resolved only when the spectral angle is lower than 30°. For the 830 nm laser interference, the spectral angle would reach 30° when the ratio of laser interference imaging peak to the target imaging peak was 0.2:1, but the interference effect could be effectively filtered by the 830 nm filter. In the case of super continuum laser interference, the spectral angle was finally stabilized at 21° without considering the saturation threshold, but the detector could be oversaturated more easily. Overall, both 830 nm laser and super continuum laser can disable the spectrum recovery process, but the mechanisms are different since the former one shifts the characteristic peak of the spectrum and the latter makes the interference fringes unrecognizable.

Key words: spectral imaging technology; large aperture static interference imaging; spectral restoration; laser interference; interference effect evaluation

光谱成像技术是一种可以同时获取目标的几何信息和光谱信息的光学感知手段,相较于传统的成像技术拓展了探测维度,被广泛应用于遥感、侦察、环境检测、科学实验等领域^[1-5]。其中,干涉成像光谱技术利用光的干涉原理获取目标的光谱信息,具有高通量、高分辨率和高测量精度等特点,使其在航天、遥感等领域更具有应用潜力^[6-8]。

* 收稿日期:2021-08-04; 修订日期:2021-12-17
联系方式:孟凡欣, 1429868773@qq.com。
通信作者:程湘爱, 1874620361@qq.com。

自 20 世纪 60 年代以来,干涉成像光谱技术的发展主要集中在两个方面:干涉成像光谱仪的设计和傅里叶变换光谱学的发展。近年来,为满足机载的要求,干涉成像光谱仪的设计越来越致力于向小型化^[9-12]、高分辨率、像差小^[13-15]的方向发展。干涉成像光谱仪按照调制方式分为时间调制、空间调制和时空联合调制三种类型^[16]。其中,时间调制型干涉成像光谱仪干涉成像的光程差来自于动镜的移动,随时间变化^[16];空间调制成像光谱仪的光程差来自成像的空间位置不同,该过程依赖于可以产生两束平行光的分光器件,目前被广泛接受的有剪切分束器和双折射晶体两种^[16];时空联合调制干涉成像光谱仪的光程差来自于成像空间位置的不同,但其单次成像只可获得部分干涉信息,因此成像过程中会产生多幅图像信息,后续数据处理时对应提取得到完整的干涉图,对后续的图像压缩、图像配准和误差校正提出了新的要求。

与此同时,傅里叶变换光谱学也逐步发展完善。切趾理论^[17]和相位误差理论^[18-20]的发展,使得光谱复原流程从最初的简单傅里叶变换,逐步发展出了包括数据预处理、切趾处理、相位误差校正和 FFT 的处理流程。除此之外,许多新的谱估计算法的发展也使得复原光谱更加精确、稳定^[21,22]。

总结来看,干涉成像光谱技术发展至今,其成像机理方面的研究已比较完备,应用也逐步走向成熟,但对于干涉成像光谱仪的干扰机理与效果的研究尚无公开报道。干涉成像光谱系统为提高灵敏度,一般设置较大的入射光瞳,这使其相对直接成像的光谱仪更容易过度曝光,使光谱信息受损。另外,随着其在军事领域的潜在应用,复杂的工作环境使强光干扰对光谱信息的影响越发不可被忽视。目前,强光干扰的相关研究主要针对于传统成像^[23-25]和探测器^[26-27],少量研究针对直接成像的多光谱相机^[28]。但干涉成像光谱仪的成像方式属于间接成像,需要对成像结果进行光谱反演得到光谱信息,这使得其干扰机理与传统相机和色散分光的光谱仪不同,需要针对其进行专门研究。

本文针对干涉型成像光谱仪的典型代表——大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS),基于其成像机理,通过仿真模拟,开展激光对光谱信息的干扰情况的初步研究,以期为进一步系统开展同类型光谱仪的激光辐照效应和损伤机理研究奠定初步基础,进而为光谱成像系统的激光防护和性能优化提供可能的参考。

1 仿真原理与方法

1.1 LASIS 成像原理

LASIS 的成像原理^[29]等效示意图如图 1 所示。图 1(a)为 LASIS 成像过程图,图 1(b)为 LASIS 干涉原理图。

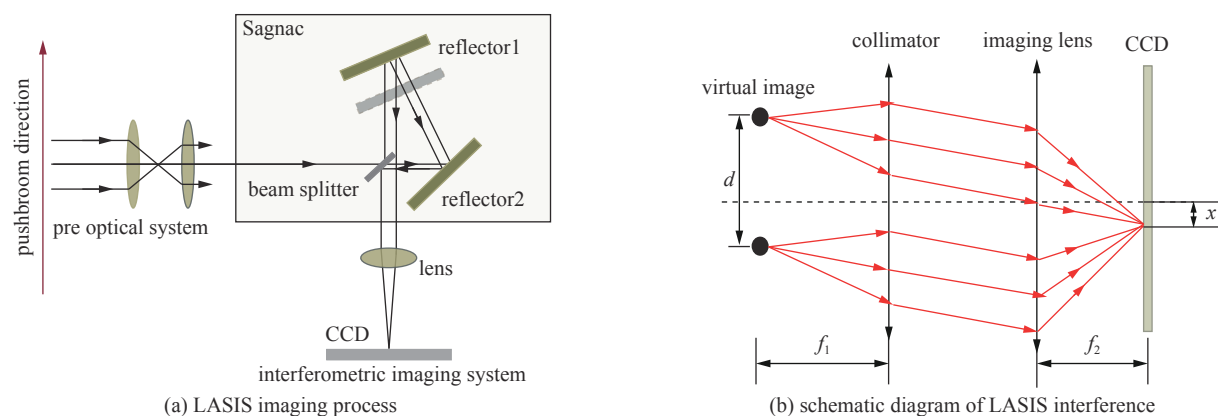


Fig. 1 Equivalent diagram of large aperture static interference imaging spectrometer (LASIS) imaging principle

图 1 LASIS 的成像原理等效示意图

LASIS 主要分前置光学系统和干涉成像系统两部分,如图 1(a)所示。无限远处的入射光通过前置望远系统入射至 Sagnac 横向剪切干涉仪,经过干涉仪形成两束平行的相干光出射,这两束相干光通过干涉仪后方的会聚光学系统后发生干涉,成像在系统后焦面上的探测器上。探测器上不同空间位置处的光程差不同,因而成像存在干涉条纹,这是 LASIS 空间调制的体现。当干涉过程如图 1(b)所示时,光程差 δ 的表达式可写为

$$\delta = d \sin \omega = \frac{dx}{f_2} \quad (1)$$

式中: d 为 Sagnac 横向剪切干涉仪的横向剪切量; x 为成像位置距 CCD 零光程差位置的距离; f_2 为像方焦距。

LASIS 每次成像仅可获得待测目标的部分光谱信息;想要获得完整的光谱信息,需要对待测目标进行推扫成像。图 2 表示 LASIS 的推扫成像过程,其中 X_i 表示面阵探测器中第 i 列像元, t_i 表示第 i 时刻。在 LASIS 推扫成像过

程中, 每一个 t_i 时刻都会产生一幅成像图。而对于一个特定的被探测目标点, 在不同时刻成像在探测器的不同像元处, 随推扫过程, 其成像位置依次遍历 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_i$ 。由此可见, 对于某个目标单元, 单次成像无法获取完整部分的干涉信息, 这是 LASIS 时间调制的体现。

扫描过程结束后, 可从所有的成像结果中提取相应的数据整合得到的完整干涉图 I_i , 其表达式为

$$I_i(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B_i(\nu) \left[\cos\left(2\pi \nu \frac{dx}{f_2}\right) + 1 \right] d\nu \quad (2)$$

式中: i 为目标单元标号; $B_i(\nu)$ 为该单元的光谱分布; ν 为波数。可以看出干涉图是由交流分量 I_{iAC} 和直流分量 I_{iDC} 组成。其中, 只有交流分量包含所需要的干涉信息, 故在后续分析中不再考虑直流分量。

$$I_{iAC}(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B_i(\nu) \cos\left(2\pi \nu \frac{dx}{f_2}\right) d\nu \quad (3)$$

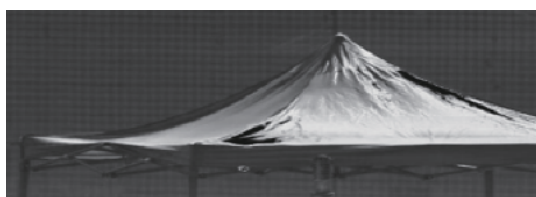
分析发现交流分量 I_{iAC} 与原始光谱 $B_i(\nu)$ 满足傅里叶变换对的关系, 对其进行傅里叶逆变换可以得到复原光谱 $B'_i(\nu)$ 。

$$B'_i(\nu) = \int_0^L I_{iAC}(x) \cos\left(2\pi \nu \frac{dx}{f_2}\right) dx \quad (4)$$

故仿真过程中可利用式(2)对成像过程进行仿真得到干涉成像图, 后续基于式(4)得到复原光谱。

1.2 干涉图模拟

图 3(a) 是通过 LASIS 拍摄得到的实际地图(长边像素点数 $n_z=340$, 短边像素点数 $n_x=120$), 在仿真过程中将其作为探测目标。通过探测发现, 该部分地物大部分的辐射光谱均大致如图 3(b) 所示, 为简化仿真过程, 目标各空间元的辐射光谱均采用该分布。



(a) simulation feature picture

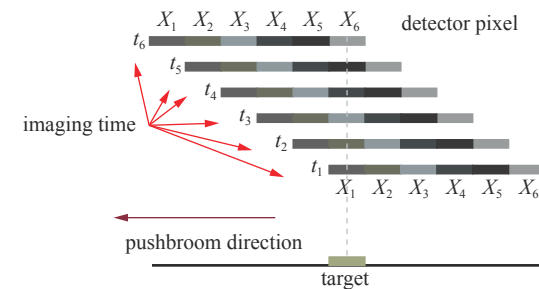
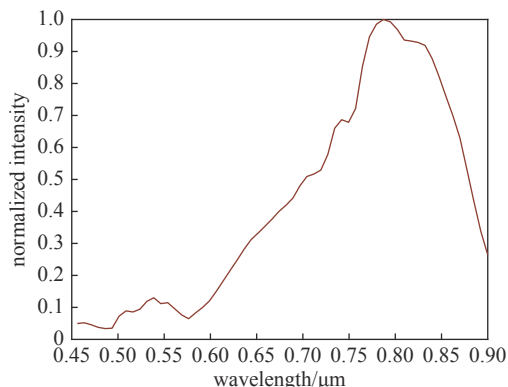


Fig. 2 Imaging process of LASIS on the detector

图 2 LASIS 于探测器上的成像过程



(b) simulation ground object's radiation spectrum

Fig. 3 Simulation feature information

图 3 仿真地物信息

图 4 是仿真采用的干扰情况图。处理过程中采用的模拟干扰为激光干扰, 结合实际情况, 分别选择 830 nm 的单体激光(光谱线宽为 0.06 nm)和波长分布范围为 450 ~ 900 nm 的超连续谱激光作为模拟对象。其光谱分布图如图 4 所示。此处将干扰形状设置成以 $(n_x/2, n_z/10)$ 为圆心的圆形分布, 其强度分布是满足光腰为 $n_x/50$ 的高斯分布。

由于参与仿真的光谱均设置为归一化光谱, 故可将式(3)改写为

$$I_{iAC}(x) = A \int_{\nu_1}^{\nu_2} B_{i0}(\nu) \cos\left(2\pi \nu \frac{dx}{f_2}\right) d\nu \quad (5)$$

其中 $B_{i0}(\nu)$ 为归一化后的光谱信息, 包含光谱幅度信息的常

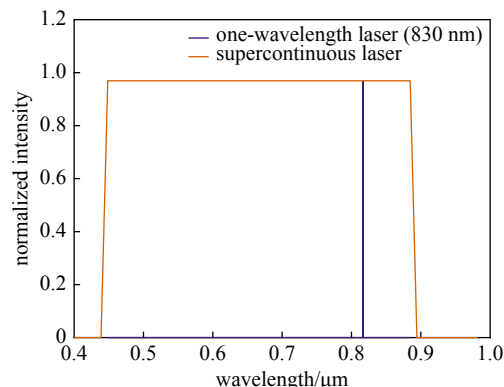


Fig. 4 Simulation of laser jamming information

图 4 仿真激光干扰信息

数 A 被提取出来, 不参与积分运算。

通过仿真得到干涉成像结果如图 5 所示, 其中图 5(a) 是无干扰成像结果, 图 5(b) 为干扰后成像结果。在仿真程序设计中, 为方便后续数据处理和观察, 假设成像显示结果灰度值越小(0 为黑色, 255 为白色), 对应的光强越大。



Fig. 5 Simulation imaging results

图 5 仿真成像结果

1.3 光谱反演

利用得到的干涉成像图, 可以通过光谱反演处理得到对应的光谱信息。现有的光谱反演算法主要考虑图像预处理、切趾、相位误差校正和 FFT 四个方面^[4]。但由于仿真成像部分只是基于式(3)进行了简单的变换过程, 未考虑显示过程中的诸多复杂影响, 故在实际光谱复原过程中采取的主要流程为: 数据预处理、数据插值、FFT。

针对实际地物的图像和光谱信息得到的仿真成像结果进行光谱反演, 得到无干扰影响时的复原光谱与原始光谱对比图如图 6 所示。

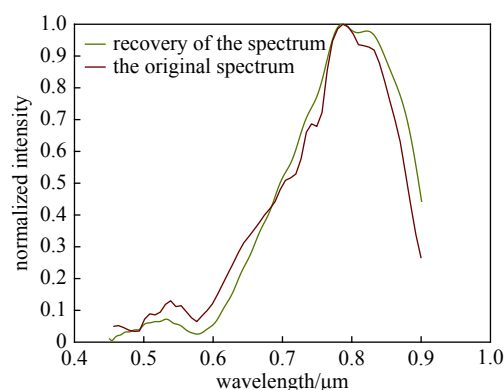


Fig. 6 Comparison of restored spectrum and original spectrum when there is no laser jamming

图 6 无激光干扰时复原光谱与原始光谱对比图

2 仿真结果与分析

2.1 830 nm 激光干扰复原

通过式(5)可知, LASIS 成像过程中, 当空间元内成像目标的辐射强度 A 增强时, 成像结果中干涉条纹的峰值强度 $I_{iAC}(x_{max})$ 也会对应增强。当仿真过程中其他条件不变时, 两者之间满足线性关系。在仿真时, 光在传输过程中的衰减情况会随设定参数而变化, 为消除该部分仿真参数设置的特殊性, 在分析过程中主要考虑干扰与目标成像结果中干涉条纹的峰值强度的比值关系。并给出本次仿真的辐射强度与干涉条纹峰值的关系分布, 以便反推出对应的辐射强度关系。

将干扰与目标成像的干涉条纹峰值强度的比值依次设置为 0.1:1, 0.2:1, 0.3:1, ..., 1:1, 得到不同情况下复原光谱强度归一化分布图如图 7(a) 所示, 以便直观分析激光干扰对于原始光谱形状分布的影响。此外, 图 7(b) 为干扰与目标的辐射强度比值随干扰与目标成像峰值强度比值变化关系, 方便针对图 7(a) 中不同成像强度比值推算出对应的辐射强度比值。图 7(c) 为 830 nm 激光干扰与目标各自成像峰值强度随辐射强度变化的关系, 可以直观地发现 830 nm 激光干扰成像后的干涉峰值强度衰减为初始辐射强度的 0.41, 目标成像后的干涉峰值强度衰减为初始辐射强度的 0.54。

分析发现对于单波长激光干扰, 对于目标光谱的分布情况存在较大程度上的扰动。随着干扰强度增加, 复原光谱逐渐呈现更加明显的干扰光谱的特性, 原始光谱的光谱特征逐渐被干扰淹没。

针对该种单一波长激光干扰的特征, 考虑在 LASIS 镜头前加入对应波长的滤光片(滤除波长为 830 nm, 使强度衰减为原光强的 10^{-4}), 分析其抗干扰效果和对原始光谱复原的影响。加入滤光片后, 对应入射的目标光谱分布如图 8 所示。可以看出进入 LASIS 的目标光谱, 830 nm 处的光谱信息已基本被完全滤除。

将干扰强度与目标辐射强度之比设置为 1:1, 对应图 7 情况发现, 此时复原光谱失真严重, 基本只可分析得到干扰信息。得到加入滤光片后复原光谱与原始光谱对比如图 9 所示。

分析发现此时的复原光谱与原始目标光谱十分接近, 丢失的 830 nm 处的光谱信息并未影响复原光谱的分布。认为, 加入滤光片可以较好地滤除 830 nm 激光的干扰, 对原始光谱复原的影响较小。故而, 在 LASIS 镜头前

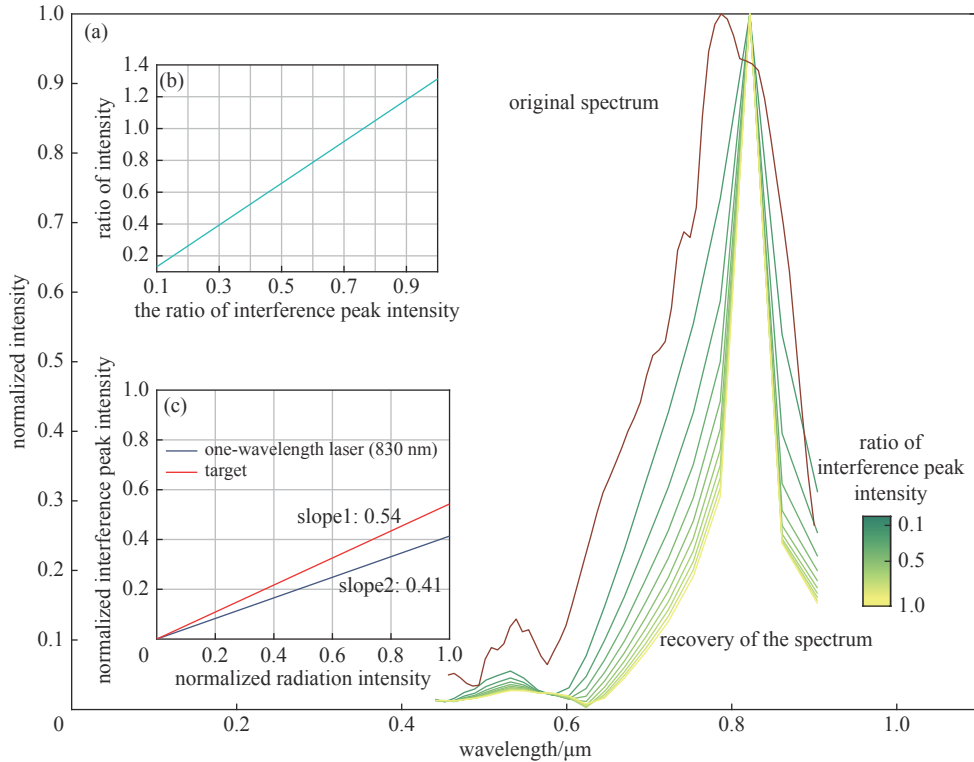


Fig. 7 Normalized intensity distribution of restored spectrum under different intensity of 830 nm laser jamming

图 7 不同激光干扰强度下复原光谱强度归一化分布图

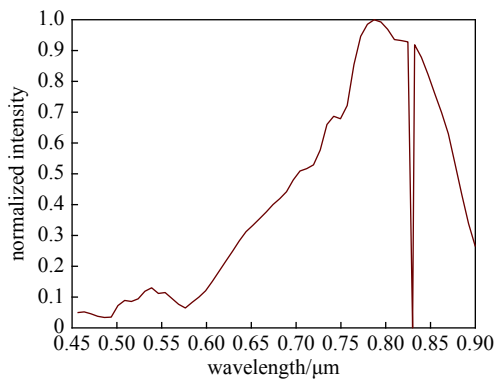


Fig. 8 Incident spectrum after the filter

图 8 经过滤光片后的入射光谱

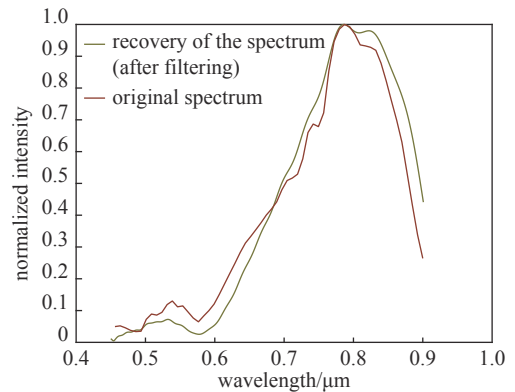


Fig. 9 Comparison of the restored spectrum and the original spectrum after adding the filter

图 9 加入滤光片后复原光谱与原始光谱对比

加入恰当的滤光片，便可以成功消除对应的单波长激光的干扰效果。

2.2 超连续谱激光干扰复原

对于超连续谱激光干扰情况，同样依次改变干扰与目标成像干涉条纹的峰值强度的比值为 0.5:1, 1:1, 1.5:1, ..., 4.5:1, 得到不同情况下复原光谱分布图如图 10(a)所示。此处同样着重考虑激光干扰对于原始光谱的形状的影响，将图中的光谱数据均各自归一化。此外，图 10(b)为干扰与目标的辐射强度比值随干扰与目标成像峰值强度比值变化关系，方便针对图 10(a)中不同成像强度比值推算出对应的辐射强度比值。图 10(c)为超连续谱激光干扰与目标各自成像峰值强度随辐射强度变化的关系，可以直观地发现超连续谱激光干扰成像后的干涉峰值强度衰减为初始辐射强度的 0.96，基本不存在强度的衰减。

分析发现对于该种干扰，干扰后的复原光谱仍能够一定程度上反映原始光谱的特性。而且，随着干扰强度增加，干扰对于复原光谱分布的影响变化较小。

但在实际成像过程中，LASIS 的探测器存在饱和和阈值。而且，观察图 10(c)与图 7(c)，对比发现超连续谱成像后干涉条纹峰值强度：辐射强度达到 0.96，相对于 830 nm 激光干扰的 0.41，整个成像过程中基本不存在强度的衰

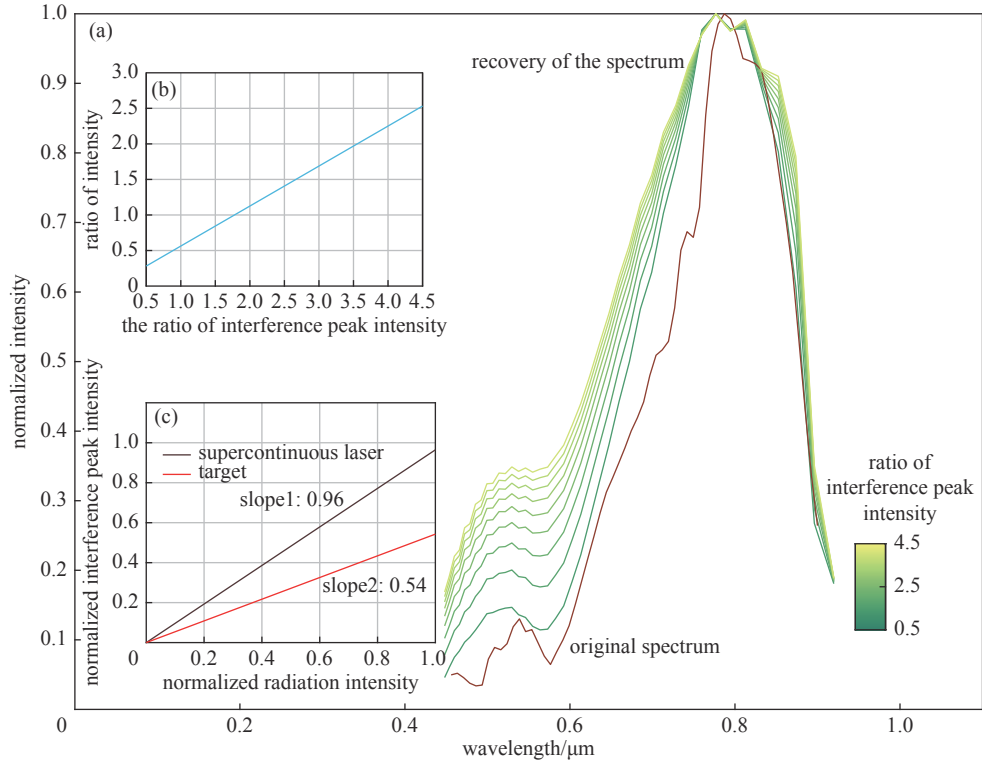


Fig. 10 Normalized intensity distribution of restored spectrum under different intensity of supercontinuum laser jamming

图 10 不同干扰强度下复原光谱归一化分布图

减。认为超连续谱激光干扰较容易使探测器达到饱和,故在此加入探测器饱和阈值,为目标成像干涉图峰值的 3 倍,重新仿真得到复原结果如图 11 所示。

分析发现饱和阈值的加入使得同等条件下,复原光谱畸变更加严重。为更直观地分析该条件下的干扰效果,

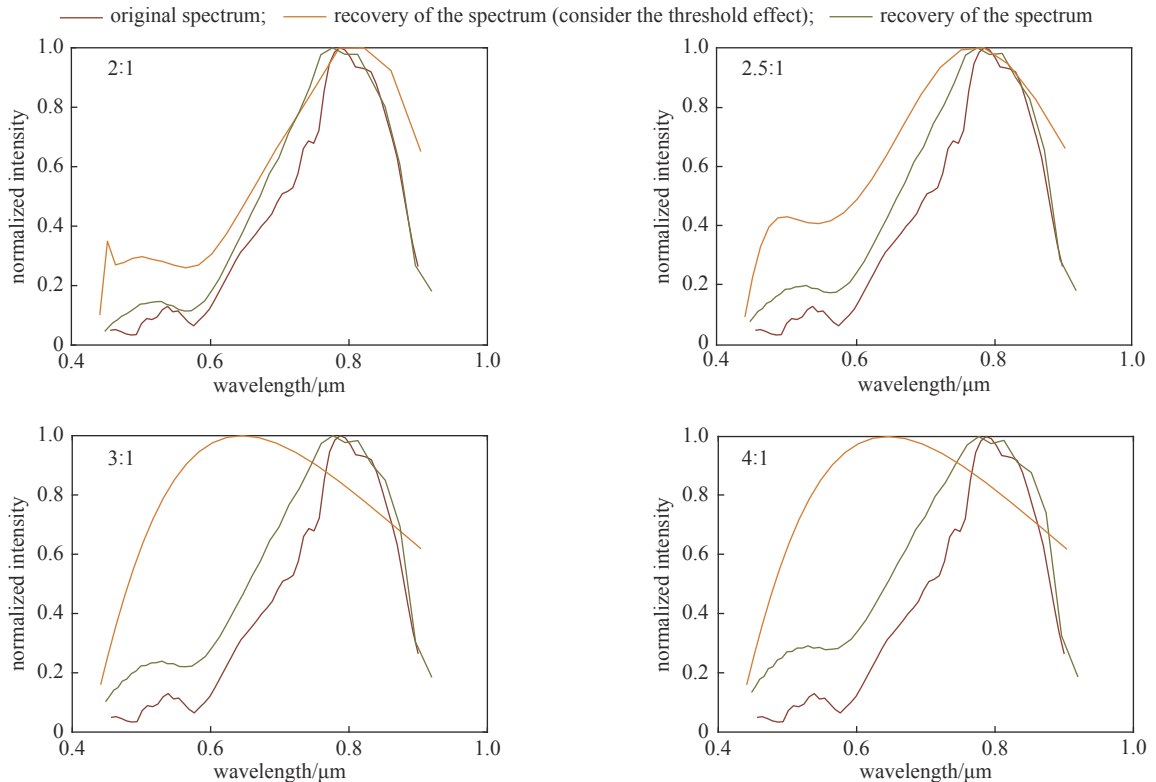


Fig. 11 Recovery results under different laser jamming intensity after setting the saturation threshold

图 11 设置饱和阈值后不同干扰强度下复原结果

利用光谱角^[30]进行复原效果分析,得到加入相应阈值后,光谱角随干扰强度变化如图12所示。假设光谱角数值大于 30° 时无法体现原始光谱特征,分析发现,恰好达到干扰阈值(干扰干涉图峰值:目标干涉图峰值为2:1)时,仍能从复原光谱中分辨原始光谱信息。当干扰干涉图峰值:目标干涉图峰值大致大于2.1:1时,干扰使目标光谱信息无法辨别。

图12中光谱角曲线存在逐渐增大后下降并趋于稳定的现象,认为在干扰干涉图峰值:目标干涉图峰值小于2.6:1时,饱和使得干涉条纹损失一定信息如图13(a)所示,但仍能复原出大致信息。当大于该数值时,过度的饱和使干涉信息丢失过多(如图13(b)所示),最终复原得到的结果趋于一致。

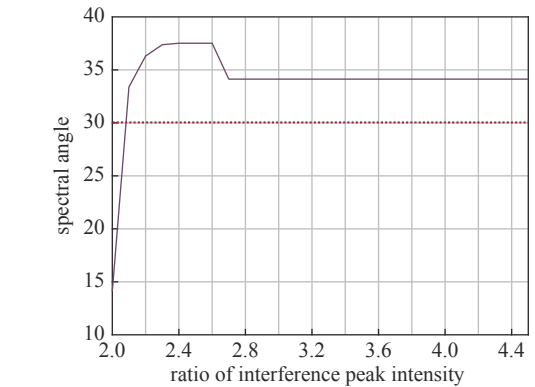
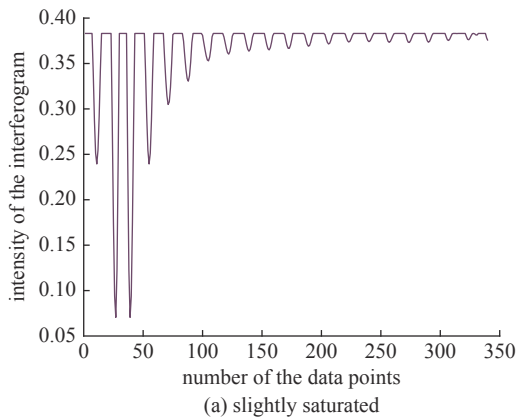


Fig. 12 Relationship between spectral angle and laser jamming
图12 光谱角随干扰强度变化图

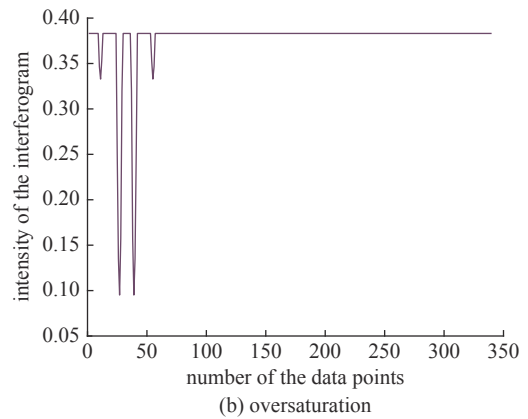


Fig. 13 Interferograms after reaching the saturation threshold

图13 达到饱和阈值后干涉图

2.3 两种干扰效果对比

图14为未达到探测器饱和阈值时,830 nm激光和超连续谱激光干扰后复原光谱的光谱角数值随干扰与目标成像强度比的变化关系。发现随着干扰强度增大,两者均使得复原光谱发生一定程度畸变,当干扰强度值达到一定数值后光谱角数值趋于稳定。但830 nm激光干扰在成像强度比大于0.2:1时便可导致原始光谱信息无法分辨;而超连续谱干扰在未达到饱和时,光谱角数值稳定在 21° ,认为始终可以分辨原始光谱信息。

总结来看,两种干扰均可使原始光谱信息无法准确反演。其中,830 nm单色激光干扰在干扰与目标成像强度峰值比大于0.2:1时便可使目标光谱信息无法分辨,干扰的具体表现是将复原光谱的特征峰向830 nm移动,但其干扰效果

可以通过滤光片滤除;超连续谱激光干扰在未饱和时干扰后光谱相对于原始光谱的光谱角数值始终小于 30° ,但其成像前后强度比为1:0.96,过程中基本无能量衰减,更容易使探测器饱和,且在成像强度略高于饱和阈值(成像强度:饱和阈值=3.1:3)时,使干涉信息大量丢失,导致光谱信息无法复原。

3 结论

本文通过模拟大孔径静态干涉成像光谱仪的成像和光谱反演过程,开展了强光干扰效果和机理的仿真研究,得到主要结论如下:(1)对于830 nm激光干扰,在干扰与目标成像强度比大于0.2:1时,光谱角便大于 30° ,认为干

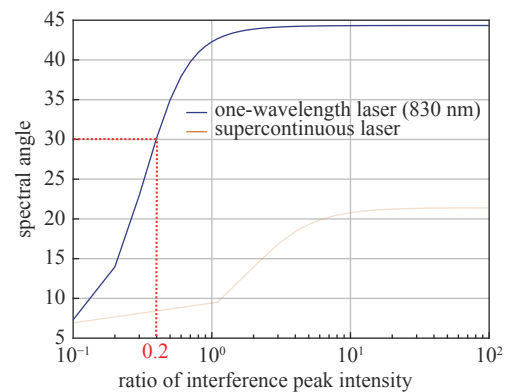


Fig. 14 Variation of spectral angle with the ratio of interference peak intensity under unsaturated condition

图14 未饱和情况下光谱角取值随干扰成像峰值强度比的变化图

扰有效。且随着干扰强度增加,干扰效果更加明显。之后,模拟加入 830 nm 滤光片的情景,得到复原光谱,发现针对单色激光干扰,加入滤光片后干扰复原光谱与原始光谱基本吻合。(2)对于超连续谱激光,在干扰不致饱和时,干扰后复原光谱相对原始光谱的光谱角最终稳定在 21° ,始终小于 30° ,认为原始光谱仍可被复原。之后考虑探测器饱和阈值的影响,发现超连续谱干扰干涉图峰值强度:干扰辐射强度为 0.96:1,成像过程中能量利用率高,容易使探测器饱和。当干扰使成像结果恰达到饱和阈值时,仍能从复原光谱中分析处原始光谱信息;当成像干涉图峰值:饱和阈值大于 3.1:3 时,原始光谱信息无法分辨。(3)未来在激光防护方面,可结合实验进一步分析滤光片对单色激光干扰的防护效果;对于超连续谱激光的防护可考虑成像前的衰减,使探测器处于不饱和的状态。

参考文献:

- [1] 尚博. 高光谱干涉成像重构技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008. (Shang Bo. Research on reconstruction technology of hyperspectral interference imaging[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008)
- [2] 崔代军, 庞其昌, 马骥, 等. 湿度对西洋参品质影响的快速无损检测[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48: 093001. (Cui Daijun, Pang Qichang, Ma Ji, et al. Rapid and nondestructive detection of quality of Panax quinquefolium effected by humidity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48: 093001)
- [3] 赵风财, 肖广兵, 张涌. 基于高光谱成像的隧道油污监测系统的设计[J]. 土木工程信息技术, 2021, 13(1): 46-50. (Zhao Fengcai, Xiao Guangbing, Zhang Yong. Design of tunnel oil pollution monitoring system based on hyperspectral imaging[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2021, 13(1): 46-50)
- [4] Pham T H, Bevilacqua F, Spott T, et al. Quantifying the absorption and reduced scattering coefficients of tissuelike turbid media over a broad spectral range with noncontact Fourier-transform hyperspectral imaging[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(34): 6487-6497.
- [5] 张瑜, 刘秉琦, 闫宗群, 等. 目标自辐射与干扰目标反射光谱的氧气吸收特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 081003. (Zhang Yu, Liu Bingqi, Yan Zongqun, et al. Oxygen absorption factors of target radiation and interference targets reflection spectra[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 081003)
- [6] Hamazaki T, Kaneko Y, Kuze A, et al. Fourier transform spectrometer for Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT)[C]//Proceedings of SPIE 5659, Enabling Sensor and Platform Technologies for Spaceborne Remote Sensing. 2005: 5659.
- [7] 江澄, 陶东兴, 何红艳. 大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪数字建模与仿真[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 94-103. (Jiang Cheng, Tao Dongxing, He Hongyan. Digital modeling and simulation of AIUS[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 94-103)
- [8] 相里斌, 王忠厚, 刘学斌, 等. “环境与灾害监测预报小卫星”高光谱成像仪[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(3): 257-262. (Xiang Libin, Wang Zhonghou, Liu Xuebin, et al. Hyperspectral imager of the environment and disaster monitoring small satellite[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(3): 257-262)
- [9] Yang Qinghua. Design study of a compact ultra-wide-angle high-spatial-resolution high-spectral-resolution snapshot imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2893-2908.
- [10] Xie Yunqiang, Liu Chunyu, Liu Shuai, et al. Snapshot imaging spectrometer based on pixel-level filter array (PFA)[J]. *Sensors*, 2021, 21: 2289.
- [11] Zhou Shiyao, Wang Yueming. A broadband spherical prism imaging spectrometer based on a single integrated module[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53: 289.
- [12] 樊星皓, 刘春雨, 金光, 等. 轻小型高分辨率星载高光谱成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2021, 29(3): 463-473. (Fan Xinghao, Liu Chunyu, Jin Guang, et al. Small and high-resolution spaceborne hyperspectral imaging spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(3): 463-473)
- [13] Liu Xingwei, Zhou Jinsong, Wei Lidong, et al. Optical design of Schwarzschild imaging spectrometer with freeform surfaces[J]. *Optics Communications*, 2021, 480: 126495.
- [14] 赵美红. 消像差凸面全息光栅成像光谱系统建模与一体化设计[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021. (Zhao Meihong. Modeling and integrated design of imaging spectrometers with aberration-correction convex holographic gratings[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021)
- [15] 赵美红, 王新宇, 姜岩秀, 等. 变间距凸面光栅成像光谱系统的消像散设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2103-2111. (Zhao Meihong, Wang Xinyu, Jiang Yanxiu, et al. Anastigmatic design of imaging spectrometer with varied line-space convex grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2103-2111)
- [16] 相里斌, 吕群波, 才敢胜, 等. Fourier变换成像光谱技术[J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(10): 1462-1474. (Xiang Libin, Lü Qunbo, Cai Qisheng, et al. Fourier transform imaging spectroscopy[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2020, 50(10): 1462-1474)
- [17] Otten III L J, Sellar R G, Rafert B. MightySat II. 1 Fourier-transform hyperspectral imager payload performance[C]//Proceedings of SPIE 2583, Advanced and Next-Generation Satellites. 1995: 2583.
- [18] Connes J. Research on formation and transformation of Fourier[J]. *Journal of Optics*, 1961, 40: 45-265.
- [19] Mertz L. Auxiliary computation for Fourier spectrometry[J]. *Infrared Physics*, 1967, 7(1): 17-23.
- [20] Forman M L, Steel W H, Vanasse G A. Correction of asymmetric interferograms obtained in Fourier spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(1): 59-63.
- [21] 相里斌. Fourier变换光谱学理论研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1995. (Xiang Libin. Theoretical research on Fourier transform

- spectroscopy[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1995)
- [22] Saarinen P E. The spectral line narrowing problem and a computer program based on the gulf tuning method[J]. *Applied Spectroscopy*, 1998, 52(12): 1569-1582.
- [23] 邵铭, 程相正, 康华超, 等. 激光对星载相机的干扰能力研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(10): 1253-1257. (Shao Ming, Cheng Xiangzheng, Kang Huachao, et al. Research on the interference ability of laser to satellite-borne camera[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(10): 1253-1257)
- [24] 于晨曦. 强光对可见光CCD摄像系统成像过程的干扰研究[J]. *数字通信世界*, 2020(1): 174-175. (Yu Chenxi. Research on the interference of strong light on the imaging process of visible light CCD camera system[J]. *Digital Communication World*, 2020(1): 174-175)
- [25] 江天, 程湘爱. 连续激光对3通道CCD相机的饱和干扰效应[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(11): 2571-2574. (Jiang Tian, Cheng Xiang'ai. Saturation interference to three-channel CCD camera by CW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(11): 2571-2574)
- [26] 郭少锋, 程湘爱, 傅喜泉, 等. 高重复频率飞秒激光对面阵CCD的干扰和破坏[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(11): 1783-1786. (Guo Shaofeng, Cheng Xiang'ai, Fu Xiquan, et al. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1783-1786)
- [27] 刘长安, 陈金宝, 马金龙, 等. 红外激光对可见光CCD成像系统的干扰[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(8): 1727-1730. (Liu Chang'an, Chen Jinbao, Ma Jinlong, et al. Jamming of visible light array CCD imaging system by infrared laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1727-1730)
- [28] 娄小程, 李晓英, 牛春晖, 等. 白光辐照多光谱CCD的干扰效应研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 703-708. (Lou Xiaocheng, Li Xiaoying, Niu Chunhui, et al. Study on the interference effect of white light irradiation multispectral CCD[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(6): 703-708)
- [29] 袁艳. 成像光谱理论与技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2005. (Yuan Yan. Research on theory and technology of imaging spectroscopy[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2005)
- [30] 赵春晖, 田明华, 李佳伟. 光谱相似性度量方法研究进展[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(8): 1179-1189. (Zhao Chunhui, Tian Minghua, Li Jiawei. Research progress on spectral similarity metrics[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(8): 1179-1189)