

doi:10.3788/gzxb20174612.1214001

激光辐照 TDI-CCD 相机饱和串扰效应及侧斑建模仿真分析

袁航, 王晓蕊, 李丹翠, 吴雄雄, 李珂

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

摘 要:根据推扫式线阵 TDI-CCD 成像系统的信号存储、传输与转换原理,分析了其在激光作用下产生不同饱和串扰现象的机理,建立了激光辐照 TDI-CCD 红外相机饱和串扰效应模型;考虑了视场外激光干扰过程中出现的侧斑现象,同时借助光学追迹模型,实现了连续激光干扰星载红外相机的成像仿真过程;通过图像质量评估因子定量分析了不同入射条件下激光辐射对相机输出图像质量的影响。结果表明:入射角不同,激光成像结果不同,选用 $1.064\ \mu\text{m}$ 视场外激光在一定入射条件下,当改变激光入射角从 2.86° 到 2.89° 时,激光将出现侧斑;当激光功率密度提高 $1\sim 4$ 倍,光斑干扰面积百分比将不同程度的扩大。

关键词:激光辐照;激光干扰;阈值建模与分析;CCD 红外相机;饱和串扰仿真;侧斑;图像质量评估

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)12-1214001-10

Modeling and Simulation Analysis for Crosstalk Effects and Secondary Spots of Laser Irradiation on TDI-CCD Camera

YUAN Hang, WANG Xiao-rui, LI Dan-cui, WU Xiong-xiong, LI Ke

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on push broom linear TDI-CCD imaging system, the principle of charge storage and signal transfer process was studied. According to the mechanism of saturation and crosstalk phenomenon induced by different continuous laser conditions, the crosstalk effects model was established. The modeling and simulation process for secondary spot was included. With an optical ray tracing model, the irradiant distribution of the imaging result was simulated when continuous laser jamming the satellite-borne infrared camera. Some general quality factors on imaging results were selected to qualitatively evaluate output images with given laser irradiant angles. The research indicates that the laser jamming result is different as the laser incident angle changes. At the given condition of $1.064\ \mu\text{m}$ off-axis laser, when the laser incident angle differs from 2.86° to 2.89° , the secondary spot appears; When the laser power density is increased by $1\sim 4$ times, the percent of the crosstalk areas after laser jamming raises to some extent.

Key words: Laser irradiation; Laser disturbance; Threshold computation; Infrared CCD image sensor; Crosstalk simulation; Laser speckle; Image quality evaluation

OCIS Codes: 140.3330; 040.3060; 040.1520; 110.3000

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61377007,61575152)和中央高校基本业务费(Nos.NSIY151410,NSIZ011401)。

第一作者:袁航(1993—),女,博士研究生,主要研究方向为红外成像全链路建模及仿真.Email:yhbubu0525@163.com

导师(通讯作者):王晓蕊(1976—),男,教授,博导,博士,主要研究方向光电成像系统工程优化设计、协同仿真、性能测试与评估等.Email: xrwang@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2017-08-03;**录用日期:**2017-09-06

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

线阵 TDI-CCD 是一种面阵排列、但仍然依靠扫描进行成像的器件,通过对同一目标多次曝光,线阵 TDI-CCD 成像器件能获得足够高的信噪比和光电灵敏度,且具有响应度高、动态范围宽等优点^[1].利用激光干扰手段来突破基于线阵 TDI-CCD 推扫成像模式的星载卫星监测技术主要通过激光束辐照,使系统的光电传感器迷茫、饱和或暂时失效,从而导致光电观瞄设备失去正常工作能力^[2],该技术在对抗星载卫星侦察方面具有非常广阔的发展前景.通过计算机仿真手段研究分析激光干扰光学 TDI-CCD 相机的机理及现象,不仅为激光干扰实验提供数据参考,降低试验成本,还为提高 TDI-CCD 相机的抗干扰防护能力提供理论支持,具有十分重要的研究意义.

李海燕^[3-4]、刘延武^[5]、聂劲松^[6]、牛艳雄^[7]等学者在激光干扰 CCD 或 CMOS 相机的破坏机理方面开展了研究,并根据实验结果对成像机理进行了分析;高巍巍^[8]、亓凤杰^[9-10]、杨希伟^[11]等人在激光干扰线阵探测器或光电成像导引头方面进行了仿真研究.但已有研究对基于激光辐照 TDI-CCD 相机饱和及串扰信号传递和转换机理的信号级信息全链路尚未开展;也未综合考虑激光在视场外入射条件下的侧斑现象对干扰成像效果的影响;从仿真结果评估角度来看,对仿真结果的定量分析较简单.

本文基于张乐^[12]、Sun Ke^[13]等对连续激光辐照 TDI-CCD 相机的干扰实验现象研究,根据 TDI-CCD 成像系统的信号转换特性,建立了饱和串扰效应阈值模型;同时考虑视场外激光改变入射角对成像结果的影响,建立了侧斑模型.在此基础上,以某城市局部区域的遥感图像为仿真背景,完成了激光干扰星载 TDI-CCD 相机的仿真,最后定量分析了不同辐射条件下激光对相机输出图像质量的影响.

1 激光干扰 TDI-CCD 相机饱和串扰效应分析

1.1 线阵 TDI-CCD 推扫成像原理分析

如图 1 为线阵 TDI-CCD 结构.传感器单元以面阵结构排列,一端为遮光的传输 CCD 单元,其余为感光单元.沿着推扫方向,每列感光单元对场景逐次成像,并进行光电转换及电荷存储;随后每列感光单元将其所存储电荷依次向后一级相邻感光单元传输,在传输过程中电荷不断累积;在最后一列感光单元与传输 CCD 之间有读出栅,电荷信号在此可并行转移至传输 CCD 单元,随后电荷信号经过传输 CCD 列末端电荷检测装置的处理可转换为电压信号,再经过信号放大、增强处理输出至信号处理系统,最终输出图像.

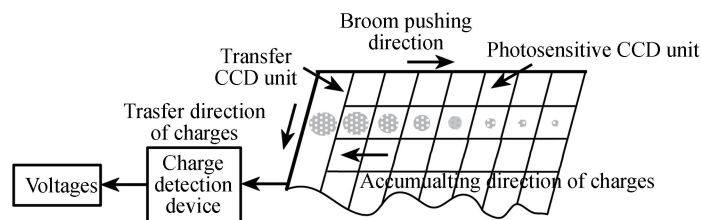


图 1 TDI-CCD 结构

Fig.1 Structure of TDI-CCD camera

1.2 饱和串扰效应阈值分析

CCD 可通过行间转移方式引起图像的饱和串扰效应.主要原理为:曝光时间内感光单元在完成光电转换后将生成的电荷收集在其势阱中,当势阱中的电荷数目超过 CCD 单元饱和阈值时,电荷向相邻 CCD 单元溢出,导致相邻 CCD 单元电荷增多.因此,每个感光单元不仅会通过自身内光电效应而累积电荷,还可能因为临近 CCD 单元的电荷溢出而得到额外电荷.由于电荷溢出位置不同,导致系统输出图像受到不同程度的干扰(第一类、第二类饱和串扰)^[14].当感光单元的收集势阱被光生电荷充满时,若光照仍在继续,电荷就会不断产生,超过势阱容量的电荷便会溢出至传输单元的势阱中,即第一类串扰是感光单元向传输单元的信号溢出;当传输单元的势阱容量被光生电荷充满时,超过势阱容量的电荷会依次溢出至相邻势阱,即第二类串扰是在传输 CCD 相邻势阱内的信号溢出.

结合 TDI-CCD 成像系统的信号产生、传输与转换原理,对饱和串扰效应进行阈值分析与建模.在 CCD 一个曝光周期内,电荷量将由第一级光敏元传输到最后一级.分析中,首先将 TDI-CCD 的一个曝光周期划分

为有限个等长时间间隔 Δt , 再在每个小间隔 Δt 时间内对电荷的传输进行微观分析, 如图 2.

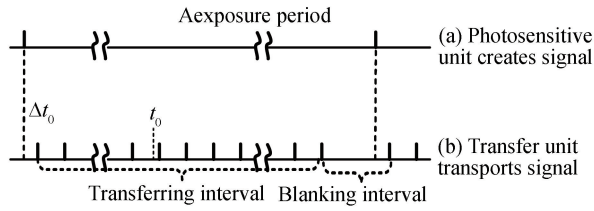


图 2 信号产生与传输状态示意图

Fig.2 States of signal generating and transferring process

由系统饱和溢出电荷的转移和传输规律可知, 光敏元 (i, j) 位置的当前存储电荷 $Q_{i,j}$ 由两部分组成: 一部分是当前 Δt 时间间隔内由于光电转换所产生新电荷 $Q_{i,j}, \Delta t$, 另一部分是在上一个时间间隔 $\Delta t - 1$ 内, 由于相邻光敏元的饱和串扰效应溢出而存储在当前光敏元 (i, j) 位置的电荷量 $Q_{i,j}, \Delta t - 1$. 根据上述, 有 $Q_{i,j}, \Delta t = Q_{i,j}, \Delta t + Q_{i,j}, \Delta t - 1$, 具体分析如图 3 所示.

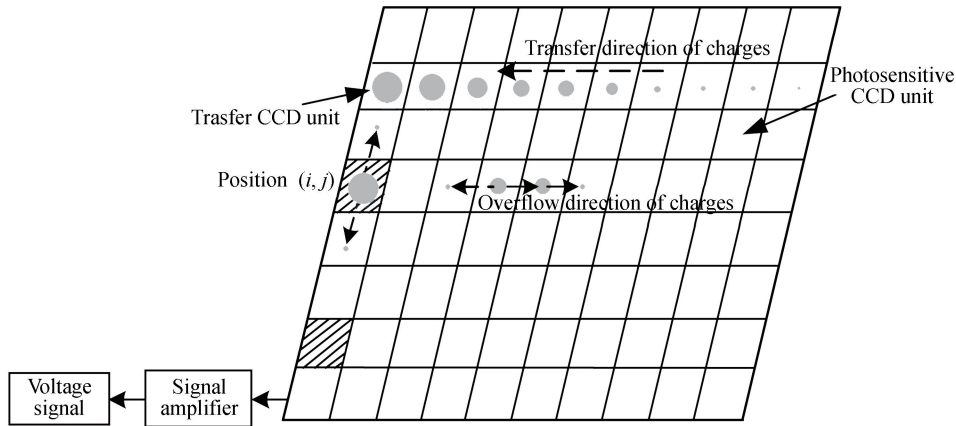


图 3 饱和溢出电荷转移及传输规律及机理

Fig.3 Transfer process and mechanism of saturated charges

假设系统串扰电荷量阈值 QBF , $Q_{i,j}$ 表示当前 (i, j) 位置存储的总电荷量, 对于每一个时间段内的值 $QBF, Q_{i,j}$ 之间的关系, 其变化规律为:

- 1) 若 $Q_{i,j} < QBF$, 表明当前位置的光敏元未发生电荷溢出, 不会对周围光敏元中的电荷量产生影响;
- 2) 若 $Q_{i,j} > QBF$, 且该光敏元不属于最后一列光敏元(不与传输 CCD 单元相邻). 此时, 饱和溢出电荷发生横向转移, 导致相邻光敏元存储电荷量增大, 发生第一类饱和串扰效应;
- 3) 若 $Q_{i,j} > QBF$, 且该光敏元属于最后一列光敏元(与传输 CCD 单元相邻). 则饱和溢出电荷在传输 CCD 单元上也会发生电荷转移, 导致相邻传输 CCD 单元存储电荷增多, 发生第二类饱和串扰.

根据此过程, 对每一曝光周期内激光作用系统产生的饱和串扰效应逐次进行计算, 直到完成场景渲染结果所有像素灰度的信号计算, 并将计算结果渲染到屏幕, 最后通过仿真软件实现激光作用系统饱和串扰效应仿真.

2 激光干扰 TDI-CCD 相机饱和串扰效应建模

图 4 为激光辐照 TDI-CCD 成像系统信号传递、转换过程. 首先借助 Tracpro 光学设计软件建立典型红外相机光学系统模型; 其次, 考虑激光在视场外入射条件下的侧斑现象, 建立 TDI-CCD 附近关键部件的详细模型. 通过光线追迹法得到推扫过程中每个曝光周期内 TDI-CCD 探测器接收到的入射光强的空间分布, 并按其时间先后顺序拼接呈完整图像; 再次根据 TDI-CCD 传感器典型参数设置饱和阈值, 判断光强空间分布中产生饱和及串扰的位置和范围. 最后通过 A/D 转换量化得到光强空间分布对应的图像灰度分布, 并将其和场景图像一同渲染到屏幕上, 且借助图像质量评价因子对干扰效果进行评估.

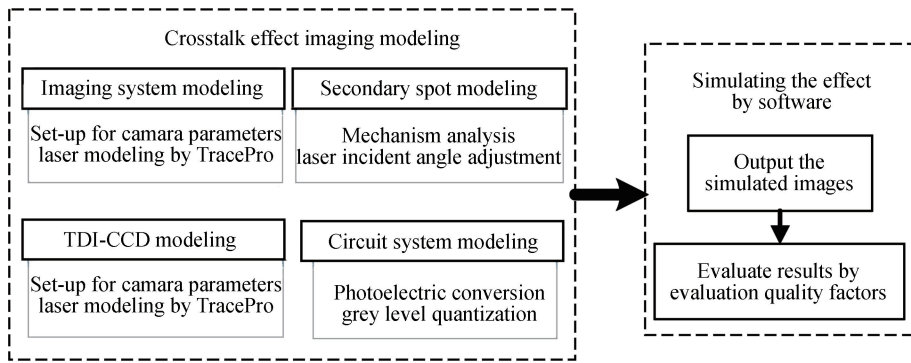


图4 激光辐照 TDI-CCD 相机信号传递和转换流程
Fig.4 Scheme of the process when laser irradiates TDI-CCD

2.1 光学系统建模

光学系统是探测器系统的一个重要组成部分,镜头的设计直接关系到成像质量.根据典型红外成像系统的相关参数,利用 TracePro 光学设计软件进行光学系统建模.光学系统所选参数见表 1.

表 1 光学系统参数指标

Table 1 Parameters of optical system

| Parameters for imaging system | Value |
|-------------------------------|-------|
| Focal length (f')/mm | 3 300 |
| Angle of view/ $^{\circ}$ | 2.12 |
| F-number | 10 |
| Entrance Pupil Diameter/mm | 330 |
| Optical transmissivity | 0.8 |

根据表 1 中各参数,设计得到成像系统如图 5.图 5 (a)、(b)分别为成像系统光路图、成像系统光学追迹图.

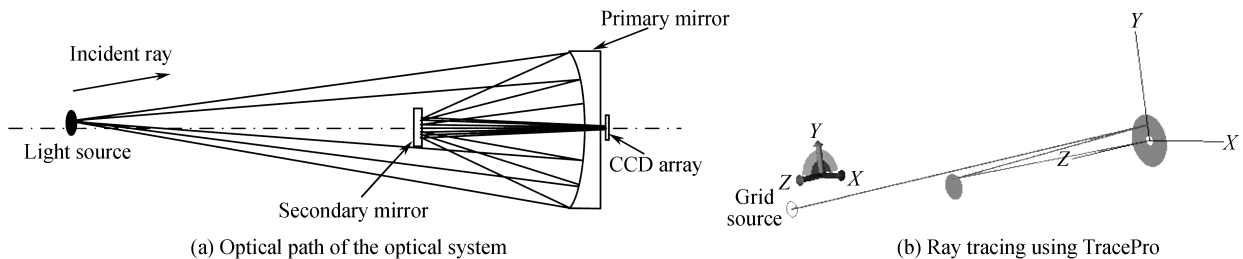


图 5 不同激光入射角激光辐射照度分布模拟图

Fig.5 Ray tracing model of the optical system

2.2 侧斑效应建模

张乐^[12]、Sun Ke^[13]等对次级光斑的原理进行分析,并通过实验证明视场外激光辐照 TDI-CCD 相机时可能产生多个光斑的成像结果,根据光束传播成像原理对主、次级光斑进行建模.图 6 是简化后 TDI-CCD 相机前端芯片的像元阵列分布与透镜结构.

当激光位于系统视场内时,激光经光学系统将直接成像至系统焦平面;而当激光位于视场外且入射方向与成像系统光轴间成一定夹角时,激光将在成像系统镜壁发生多次反射或在芯片前狭缝处发生散射后到达像平面.利用 TracePro 光学设计软件

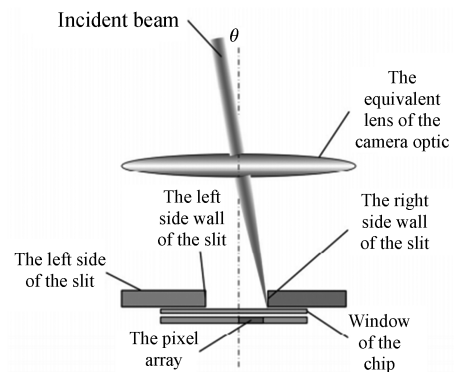


图 6 简化后的 TDI-CCD 相机前端结构图^[12]

Fig.6 Structure of the front of simplified TDI-CCD

设置激光参数(如:激光功率密度、入射角度、光腰直径等),并选择激光源为高斯光束,通过改变入射光线与系统光轴间夹角(简称激光入射角)来模拟视场外不同入射角激光在系统像平面的辐射能量分布。

当入射光线与系统光轴间夹角分别为 0° 和 2.89° (Z 轴)时,激光源在像面上的辐射照度分布见图 7。

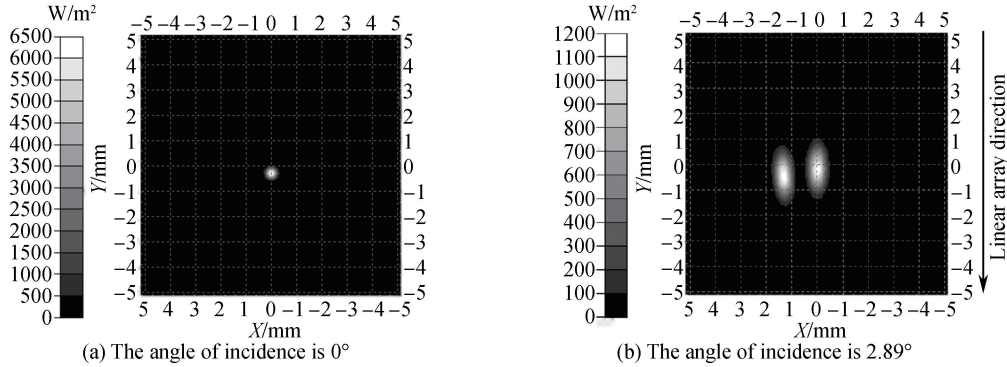


图 7 不同激光入射角激光辐射照度分布模拟图
Fig.7 Distribution of laser irradiance with different angles

由图 7 可知,改变激光入射角度导致成像形态发生变化.由于入射激光光束与光轴之间存在夹角,当高斯圆光束遇到狭缝侧壁时发生多次反射,后经芯片前狭缝处发生散射及衍射效应并成像于像平面,根据光束传播的投射关系知光斑呈椭圆状;且狭缝与像元阵列在水平方向有一定的位置偏移,主、次光斑并不是以中心对称的方式分布.其中图 7(b)中左侧光斑为主光斑,右侧为次光斑.根据激光辐照度的仿真结果,可将激光辐射数据作为仿真系统的激光输入参数进而完成仿真工作。

2.3 TDI-CCD 探测器建模

激光辐射能量经过光学系统后成像至 TDI-CCD 探测器表面,表 2 为某典型 TDI-CCD 探测器其性能指标参数。

表 2 TDI-CCD 探测器性能指标参数
Table 2 Parameters of TDI-CCD detector

| Parameters | Value |
|----------------------------|--|
| Type of detector | Push broom linear TDI-CCD |
| Pixel size | $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ |
| Pixel number | $1\ 024 \times 1\ 024$ |
| Integral series | 96 levels |
| Charge transfer efficiency | 0.98 |

波长-归一化光谱响应率曲线见图 8.根据图 8 所示 TDI-CCD 探测器性能指标及波长-归一化响应率曲线,并结合 TDI-CCD 阈值分析与饱和串扰条件,可设计相应的探测器参数,完成相关饱和和串扰效应的算法设计。

依据红外成像原理,对绝对温度为 T 的黑体辐射,焦平面阵列第 i 个单元的响应信号经过系统增益放大后可表示为

$$V_i = G_i \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) \frac{M_e(\lambda, T) A_i \cos^N(\theta_i)}{4F^2(1 + M_{optics})^2} \times \tau_{optics}(\lambda) T_{atm}(\lambda) d\lambda + D_i \quad (1)$$

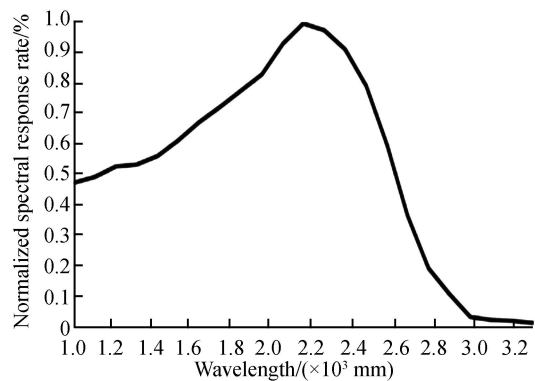


图 8 波长-归一化响应率曲线
Fig.8 Wavelength vs normalized response rates

式(1)中各参量见表 3^[15].根据所描述的探测器响应模型,在光电转换过程中,影响成像系统各探测器单元响应输出信号不一致性的主要因素有:光敏面积 A_i 、探测元相对于光轴的偏角 θ_i 、探测器响应率 $R_i(\lambda)$ 和探测元信号的放大增益 G_i .通过式(1)可完成光电转换建模过程。

表 3 探测器响应模型中变量及其含义^[13]

Table 3 Variables in detector response model

| Parameters | Definition |
|--------------------------|--|
| G_i | System gain of detector unit i |
| $R_i(\lambda)$ | Response rate of detector unit i |
| $[\lambda_1, \lambda_2]$ | Wavelength of the range of optical system |
| $M_e(\lambda, T)$ | Spectral radiance of a blackbody, absolute temperature of T , wavelength of λ , calculated by Planck Formula |
| θ_i | Offset angle with the central axis of the optical system of detector i |
| F | f -number of optical system |
| N | Rolling index $2 < N < 4$ |
| M_{optics} | Magnification of optical system |
| $\tau_{optics}(\lambda)$ | Spectral transmissivity of optical system |
| A_i | Photosensitive area of detector i |
| $T_{atm}(\lambda)$ | Atmospheric spectral transmissivity |
| D_i | Output voltage by all kinds of noise during the integral time of detector i |

在完成从辐射信号到电压信号的光电转换过程后,依据红外成像系统的 A/D 转换器位数进行灰度量化。常用转化格式主要有 8 位和 16 位两种,本文选择系统放大后的最大输出信号值转化为最大数字 255(8 位),假设变换的电压信号范围为 $V_{min} \sim V_{max}$,其灰度级范围为 $0 \sim 255$,最小灰度级 $G_{min} = 0$,最大灰度级为 $G_{max} = 255$ 。则任意输出电压信号对应的灰度级为

$$G(i) = \frac{2^{\text{bit}} - 1}{V_{max} - V_{min}} [V(i) - V_{min}] \quad (2)$$

式中, bit 表示量化位数, V_{max} 表示最大量化电压, V_{min} 表示最小量化电压, $V(i)$ 表示位置 i 上的电压信号, $G(i)$ 表示 i 位置上转化后的灰度信号。通过式(2)可完成电压到灰度的转换过程。

3 饱和串扰效应仿真及图像质量评估

为研究激光干扰线阵 TDI-CCD 相机的饱和串扰效应,以某城市区域的辐射数据为原始背景图像,依据饱和串扰效应原理及所建模型,模拟视场内、视场外两种情况不同功率密度、入射角以及不同波段下的激光串扰仿真效果。考虑到任何仿真结果都需要通过可靠的图像质量评价方法进行评价,因此结合常用的、普遍认可的图像质量评估因子对仿真前后图像进行分析与评估。其中涉及到的图像质量评估因子有:1)百分比:激光光斑面积与图像的面积比(以下简称百分比),可体现激光的干扰范围,其值范围为 $0 \sim 1$,0 表示干扰范围最小,1 表示干扰范围最大,且值越大表示干扰范围越大;2)相关度:通过图像相关度(相关函数)的计算反映激光干扰对图像的整体影响,其范围为 $0 \sim 1$,值越大表示两幅图像相关性越高,即干扰程度最小;3)归一化均方误差(Normalized Mean Square Error, NMSE):反映成像前后图像整体变化情况。

3.1 视场内激光辐射串扰仿真与分析

3.1.1 不同功率密度激光干扰仿真与分析

原始场景图像如图 9(a)。激光波长为 $1.064 \mu\text{m}$,功率密度为 5.4275 mW/cm^2 ,光源入射位置为 $(0, 100, 8000)$ (坐标单位为: mm),且与 Z 轴夹角 -0.05° ,得到的仿真图像如图 9(b)。在不改变其它条件的情

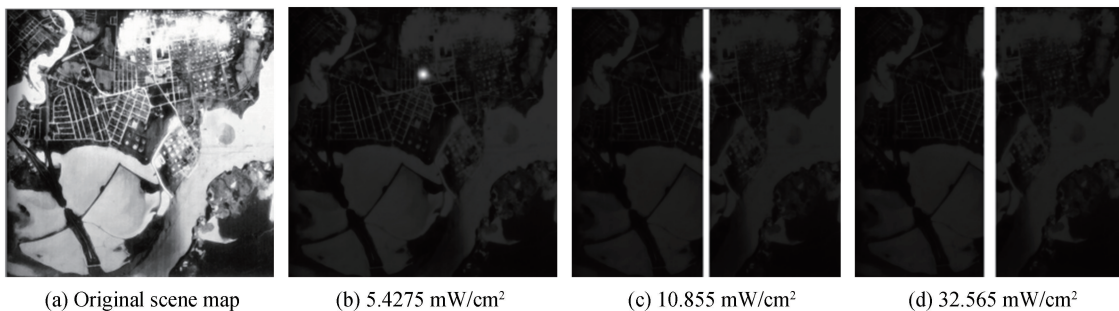


图 9 不同功率密度下的激光干扰仿真对比图
Fig.9 Simulated results of different laser power density

况下,将激光功率密度改为:10.855 mW/cm²和 32.565 mW/cm²,得到的干扰仿真结果如图 9(c)、(d)。

由仿真结果得到的图像质量评估结果见表 4。由表 4 和仿真图像可知:当激光功率不断增大时,激光串扰面积所占百分比不断增大,当激光功率密度达到 32.565 mW/cm²时,串扰面积百分比将近 4%,串扰后光斑附近的亮线不断发生横向扩展;且图像的相关度随着激光功率密度的增大呈下降趋势,即随着激光不断增强,串扰面积不断增大。结合仿真结果可知,激光功率密度会强烈影响激光串扰结果。

表 4 不同功率密度激光干扰 TDI-CCD 输出图像质量评估

Table 4 Evaluation results of different laser power density

| Power density/(mW·cm ⁻²) | Percentage of the saturated area/% | Degree of image correlation | NMSE |
|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------|
| 5.427 5 | 0.47 | 0.981 8 | 0.669 5 |
| 10.855 | 2.36 | 0.594 7 | 0.738 7 |
| 32.565 | 3.91 | 0.547 4 | 0.740 3 |

3.1.2 不同角度激光的干扰效果

设置激光波长为 1.064 μm,功率密度为 10.855 mW/cm²,改变激光入射角完成仿真。激光位置参数见表 5(坐标单位为:mm)。

表 5 不同入射角度下的激光参数设置

Table 5 Parameters of different laser incident angles

| Position | X-coordinate | Y-coordinate | Z-coordinate | Angle with the X axis | Angle with the Y axis | Angle with the Z axis |
|----------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 0 | 100 | 8 000 | 0° | -0.05° | 0° |
| 2 | 0 | 100 | 8 000 | 0° | -0.05° | 0° |

由表 5 中参数与原始场景图 10(a),得到仿真结果如图 10(b)、(c)。由图可知,通过改变激光的位置可得到不同位置的饱和串扰仿真,相应的图像质量评估结果见表 6。

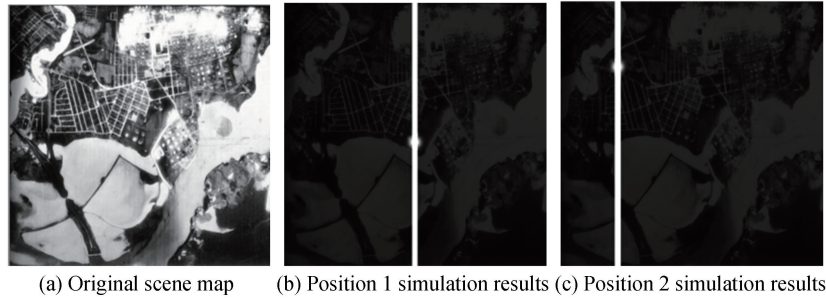


图 10 不同位置激光干扰仿真结果

Fig.10 Simulated results of different laser positions

表 6 不同位置激光干扰相机输出图像质量评估

Table 6 Evaluation results of different laser angles

| Position | Percentage of the crosstalk area/% | Degree of image correlation | NMSE |
|----------|------------------------------------|-----------------------------|---------|
| 1 | 1.980 | 0.603 3 | 0.736 9 |
| 2 | 2.170 | 0.601 4 | 0.741 0 |

由表 6 数据可知,激光入射位置是影响激光串扰结果的一个重要因素。因此在实际应用中,可根据实际需求,通过调整激光入射角度,对图像特定位置进行有效干扰。

3.2 视场外激光辐射串扰仿真与分析

3.2.1 不同波长激光干扰仿真与分析

设置激光功率密度为 217.5 mW/cm²,光源入射位置为(0,230,8 000)(坐标单位为:mm),且与 Z 轴夹角 2.86°,激光波长分别为 1.064 μm,1.315 μm,2.8 μm 时,仿真结果如图 11(b)、(c)、(d)所示。

由仿真结果可知,激光波长会影响激光干扰结果,响应率越高的波长将对仿真结果产生更为强烈的干扰。因此,在实际应用中可以根据需要选择合适的激光波长。

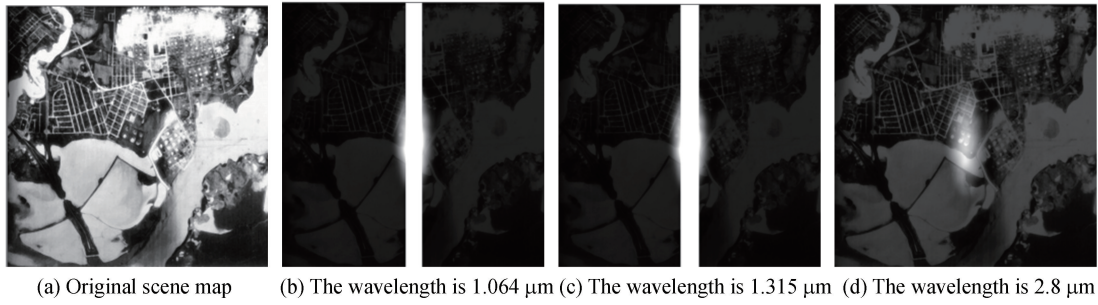


图 11 不同波长干扰仿真结果

Fig.11 Simulated results of different laser wavelengths

表 7 不同波长激光干扰相机图像质量评估

Table 7 Evaluation results of different laser wavelengths

| Wavelength/ μm | Normalized response rates | Percentage of the saturated area/% | Degree of image correlation | NMSE |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------|
| 1.064 | 0.470 | 5.98 | 0.580 1 | 0.724 5 |
| 1.315 | 0.478 | 6.42 | 0.528 0 | 0.739 7 |
| 2.8 | 0.105 | 2.56 | 0.930 4 | 0.472 1 |

3.2.2 不同入射角度激光干扰仿真与分析

对于视场外的激光辐射情况,通过改变入射角度,激光投射到 CCD 探测器上可能会出现侧斑.设激光光源入射位置为(0,230,8 000)(坐标单位为:mm),且与 X 轴夹角 0° ,与 Z 轴夹角 2.89° ,将光功率密度设置为 40 mW/cm^2 、 80 mW/cm^2 、 158.275 mW/cm^2 ,仿真结果见图 12(b)、(c)、(d).

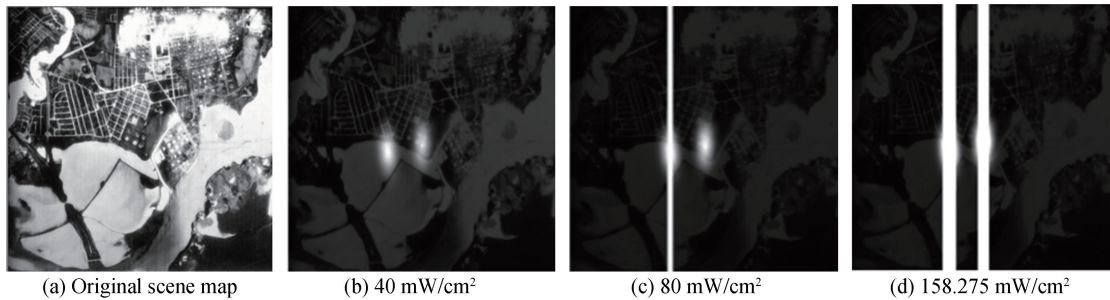


图 12 不同入射角度干扰仿真结果

Fig.12 Simulated results of different laser incident angles

由图 11 与图 12 可知,不改变激光与 X、Y、Z 相对坐标距离,仅改变激光与 Z 轴的夹角(图 11 为与 Z 轴夹角 2.86° ,图 12 为与 Z 轴夹角 2.89°),激光最终成像光斑形态发生变化,这是由于激光入射方向不同,导致激光在经过探测器前端时有可能发生光束散射现象,导致到达像面上的光斑能量分布不均,仿真结果见图 12(b);逐渐增大激光辐射强度,主次光斑由于能量差异最终呈现出不同的串扰结果,见图 12(c),此时主光斑已发生串扰,但次光斑由于能量未达到饱和串扰阈值而未发生串扰;当辐射强度增大到一定程度后,主、次光斑均出现较为强烈的串扰效果,如图 12(d).结合图像质量评估因子说明改变激光功率密度对于干扰仿真结果的影响.

表 8 多光斑干扰仿真结果图像质量评估

Table 8 Evaluation results of multi-spots

| Power density/ $(\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2})$ | Percentage of the saturated area/% | Degree of image correlation | NMSE |
|---|------------------------------------|-----------------------------|---------|
| 40 | 5.23 | 0.920 4 | 0.576 2 |
| 80 | 6.22 | 0.611 0 | 0.726 2 |
| 158.275 | 9.32 | 0.522 5 | 0.827 3 |

由表 8 可知:当激光功率密度不断增大时,归一化均方误差发生明显变化,说明随着激光功率的增强,相比于原始图像,串扰后图像各个像素处的灰度变化最为明显,因此,可以通过调整激光辐射角度达到不同的激光干扰目的.

再次改变激光入射角度进行仿真,设置激光波长为 $1.064 \mu\text{m}$,功率密度 $256.25 \text{ mW}/\text{cm}^2$,光源位置为 $(0, 529, 8000)$ (坐标单位为:mm),且与 Z 轴夹角 4.005° ,得到的仿真效果如图 13(b).在不改变其他条件的情况下,增大激光功率密度为 $543.75 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 和 $1087.5 \text{ mW}/\text{cm}^2$,得到的仿真结果分别如图 13(c)、(d) 所示.

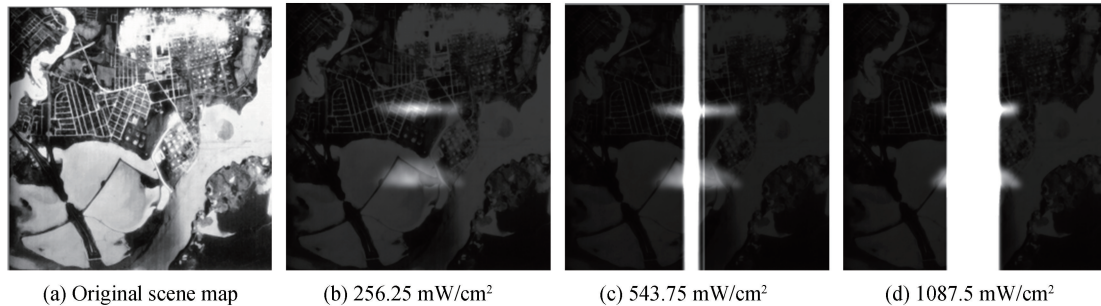


图 13 改变入射角度干扰仿真结果

Fig.13 Simulated results of different laser power density with changed laser angle

分析可知,在该入射条件下得到的激光干扰情况和图 14 的激光串扰结果有明显差异.如图 13(c),在此激光功率密度下,图像表现出了明显的第一类串扰和第二类串扰的仿真效果.图 13(c)中串扰“亮线”右侧还出现了另一条微弱的串扰“亮线”,该亮线中间位置即体现了第一类串扰结果.对比可知,第一类串扰相比于第二类串扰非常微弱,且一般情况下会被第二类串扰压制和湮没,这也正是仿真中没有明显观察到第一类串扰效应的原因:第一类串扰只影响当前像素发生电荷饱和后,超出的电荷只影响该像素所在列像素,并不向周围发生电荷转移与扩散,而第二类串扰则会明显地影响其周围部分像素列,从而导致其周围的像素列也发生明显的串扰饱和现象,表现出明显的“电荷横向溢出”现象.

4 结论

文中根据 TDI-CCD 成像系统的信号传输特性,对饱和串扰效应进行了阈值分析,同时考虑了视场外不同角度入射激光对输出图像产生的影响,建立了侧斑模型,完成了视场内、视场外激光干扰 TDI-CCD 相机的仿真,最后通过图像质量评估因子定量分析了不同激光辐射条件对图像质量的影响.

由仿真结果可知:通过改变激光强度、选择合适的波长以及调整激光入射角等方法可实现不同程度的有效干扰.研究表明:通过计算机软件仿真的手段不仅能更加直观、方便地了解激光对光学 TDI-CCD 相机的干扰情况,还可为激光干扰实验提供参考数据,从而减少实验器件损伤,降低试验成本.该研究为提高我国 TDI-CCD 相机的抗干扰防护能力提供理论支持,具有十分重要的研究价值.

参考文献

- [1] YUAN Xiao-kang. Calculation and compensation for the deviant angle of satellite borne tdi-ccd push scan camera[J]. *Aerospace Shanghai*, 2006, **23**(6): 10-13.
袁孝康. 星载 TDI-CCD 推扫相机的偏流角计算与补偿[J]. *上海航天*, 2006, **23**(6): 10-13.
- [2] 刘京郊. 光电对抗技术与系统[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2004: 130-156.
- [3] LI Hai-yan, ZHU Min, LU Hong-yi. Off-axis laser disturbing CCD imaging guidance weapons[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 66-69.
李海燕, 朱敏, 卢洪义. 视场外激光对 CCD 成像制导武器的干扰研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(1): 66-69.
- [4] LI Hai-yan, ZHU Min, LV Jun-wei, et al. Experiment research and theory analysis for off-axis laser disturbing CCD detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(5): 840-843.
李海燕, 朱敏, 吕俊伟, 等. 视场外激光干扰 CCD 探测系统实验研究与理论分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(5): 840-843.
- [5] LIU Yan-wu. Experiment research on laser disturbing CCD detectors[J]. *Laser Journal*, 2011, **32**(1): 55-56.
刘延武. 激光干扰 CCD 系统的实验研究[J]. *激光杂志*, 2011, **32**(1): 55-56.
- [6] NIE Jin-song, WANG Xi, LI Hua, et al. Thermal and mechanical damage in CCD detector induced by $1.06 \mu\text{m}$ laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(S2): 380-386.
聂劲松, 王玺, 李化, 等. $1.06 \mu\text{m}$ 激光辐照 CCD 探测器的热力效应分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(S2): 380-386.
- [7] NIU Yan-xiong, ZHANG Peng, YAO Jian-quan, et al. Investigation of laser disturbance and damage to satellite-borne

- photoelectric detecting system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 793-796.
牛艳雄,张鹏,姚建铨,等. 强激光对星载光电探测系统的干扰与破坏研究[J]. 光子学报,2004,**33**(7):793-796.
- [8] GAO Wei-wei. Simulation of the cross talk effect of lasers on the infrared imaging system[J]. *Electronic Science and Technology*, 2010, **23**(6): 35-37.
高巍巍. 红外成像系统激光干扰饱和和串音效应的仿真[J]. 电子科技,2010,**23**(6):35-37.
- [9] QI Feng-jie, LI Hua, WANG Min, *et al.* Image simulation of laser jamming on infrared focal plane detector[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, **36**(2): 213-215.
齐凤杰,李华,王敏,等. 激光干扰红外焦平面器件的干扰图像仿真[J]. 半导体光电,2015,**36**(2):213-215.
- [10] QI Feng-jie. Study on cross-talk of laser jamming on interline transfer CCD[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, **35**(01): 23-25.
齐凤杰. 激光干扰行间转移 CCD 串扰现象研究[J]. 半导体光电,2014,**35**(01):23-25.
- [11] YANG Xi-wei, TONG Zhong-cheng, WANG Ya-fu, *et al.* Modeling and simulation of laser jamming for electro-optical imaging guided seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(7): 1243-1248.
杨希伟,童忠诚,汪亚夫,等. 激光干扰光电成像导引头的建模与仿真[J]. 红外与激光工程,2011,**40**(7):1243-1248.
- [12] ZHANG Le, ZHAO Wei, SHAO Ming, *et al.* Experiment study on saturation effect of 1.06 μm laser jamming TDI-CCD camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(S1): 38-42.
张乐,赵威,邵铭,等. TDI-CCD 相机的 1.06 μm 激光饱和和干扰实验研究[J]. 红外与激光工程,2013,**42**(S1):38-42.
- [13] JIANG H, SUN K, HUANG L, *et al.* Analysis and simulation of the phenomenon of secondary spots of the TDI CCD camera irradiated by CW laser[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(24): 23901-7.
- [14] 王骥坤. TDI-CCD 成像系统激光干扰效应仿真研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [15] 王晓蕊. 红外焦平面成像系统建模及 TOD 性能表征方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2005.