

# TDI-CCD的曝光时长优化方法研究

潘毅华<sup>1,2</sup>, 张相祎<sup>2</sup>, 刘伟艇<sup>2</sup>, 李宇阳<sup>3</sup>, 刘 宾<sup>1,2</sup>, 韩 焱<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 智能探测技术与装备山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

3. 北京理工大学 光电成像与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 曝光时长是时间延迟积分电荷耦合器件(Time Delay Integrated Charge Coupled Device, TDI-CCD)成像系统中的重要参数之一, 对成像结果的质量有重要影响。为了提升TDI-CCD成像系统的图像像质, 提出一种基于梯度的算法, 对速度失配条件下TDI-CCD相机的曝光时长参数进行优化。根据光电成像传感器的成像原理, 构建关于TDI-CCD的成像数学模型, 通过数学方式将图像灰度与曝光时长进行关联。在此基础上, 构建关于曝光时长的代价函数, 并采用基于梯度的算法对曝光时长参数进行优化。仿真与实验结果表明, 所提方法可将两种场景的峰值信噪比分别提升约50%与20%, 有效改善了TDI-CCD在速度失配条件下的成像质量, 对目标物探测精度的提升具有重要意义。

**关键词:** 计算成像; 数值优化; 时间延迟积分; 曝光时长; 梯度算法

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025053

**引用格式:** 潘毅华, 张相祎, 刘伟艇, 等. TDI-CCD的曝光时长优化方法研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 397-405.

PAN Yihua, ZHANG Xiangyi, LIU Weiting, et al. Research on optimization method of exposure time for TDI-CCD [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 397-405.

## Research on Optimization Method of Exposure Time for TDI-CCD

PAN Yihua<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiangyi<sup>2</sup>, LIU Weiting<sup>2</sup>, LI Yuyang<sup>3</sup>, LIU Bin<sup>1,2</sup>, HAN Yan<sup>1,2</sup>

(1. Shanxi Key Laboratory of Intelligent Detection Technology & Equipment,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System of Ministry of Education of China,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The exposure duration is one of the important parameters in the time delay integrated charge coupled device (TDI-CCD) imaging system, which has a significant impact on the quality of imaging results. To improve the image quality of TDI-CCD imaging systems, a gradient-based algorithm is proposed for optimizing the exposure duration parameters of TDI-CCD cameras under velocity mismatch conditions. An imaging mathematical model is constructed for TDI-CCD based on the imaging principle of photoelectric imaging sensors, and the image grayscale is mathematically associated with exposure dura-

收稿日期: 2024-10-09

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2024M752994); 山西省基础研究计划资助项目(202403021212340)

作者简介: 潘毅华(1992-), 男, 讲师, 博士, 主要从事计算成像研究。E-mail: panzhan92@163.com.

tion. On this basis, a cost function for exposure duration is constructed and a gradient-based algorithm is used to optimize the exposure duration parameters. Simulation and experimental results show that the proposed method can increase the peak signal-to-noise ratio of two scenarios by about 50% and 20% respectively, effectively improving effectively the imaging quality of TDI-CCD under velocity mismatch conditions, which is of great significance for improving the accuracy of target detection.

**Key words:** computational imaging; numerical optimization; time delay integration; exposure duration; gradient algorithm

## 0 引言

与传统成像技术不同,时间延迟积分(Time Delay Integrated, TDI)成像技术基于线性阵列光电探测器,可对同一目标物体进行多次曝光,具有灵敏度高、动态范围大、噪声低等优点<sup>[1-2]</sup>。因此,TDI技术被广泛应用于航空航天<sup>[3-5]</sup>、遥感成像<sup>[6-8]</sup>、工业检测<sup>[9]</sup>和医学成像<sup>[10]</sup>等领域。TDI的成像传感器主要包括 TDI-电耦合器件(TDI-Charge Coupled Device, TDI-CCD)传感器以及 TDI-互补金属氧化物半导体(TDI-Complementary Metal Oxide Semiconductor, TDI-CMOS)传感器。二者的主要区别在于数据的传送方式不同,以及传感器内部集成的电路不同。其中,CCD传感器内部仅包含一般集成放大电路,而CMOS传感器内部包含模数转换电路、模拟信号处理电路等电路<sup>[11]</sup>。相比于TDI-CMOS,TDI-CCD具有更高的感光度,常用于光线不足的场景,可更好地捕捉微光信号<sup>[12]</sup>。

根据 TDI-CCD 的成像机制,需要目标物与相机之间处于相对运动状态,并且二者之间的相对运动速度需要与 TDI-CCD 相机的行周期相匹配,如此才能对目标物的同一物点进行多次曝光,并将其信号叠加成像<sup>[13]</sup>。当目标物与相机之间的运动速度与相机行周期不匹配时,相机所拍摄的图像会出现模糊伪影,影响用户对目标物的观测。其主要原因在于相机对非同一物点信号进行叠加,导致最终成像结果中出现伪影效应,其产生的物理机理与光学合成孔径成像类似<sup>[14]</sup>。针对这一现象,研究人员提出多种不同方案。Pan等<sup>[15]</sup>提出一种连续动态拍摄模型表征相机对卫星的推扫模式,并在该模型基础上采用基于上下文的自适应图像恢复方法对伪影图像进行修复。Zhu等<sup>[16]</sup>建立了多级积分与单级积分抖动误差之间的精确关系,根据抖动误差和成像参数,建立不同积分阶段与图像抖动失真曲线,并进行校正。石俊霞等<sup>[17]</sup>采用一种改进的灰度投影算法计算

振动参量,并采用逐行恢复方法对伪影图像进行恢复,有效提升了图像的峰值信噪比。Yu等<sup>[18]</sup>通过减轻成像灵敏度,构建振动模型,并消除了部分成像约束,可用于对图像伪影的去除。Wang等<sup>[19]</sup>针对电荷转移引起的拖尾问题,通过构建数学模型的方式描述电荷转移过程,提出了一种新的相位定时方法,独立获取成像行和隔离行的定时信号,用于减小拖尾带来的影响。

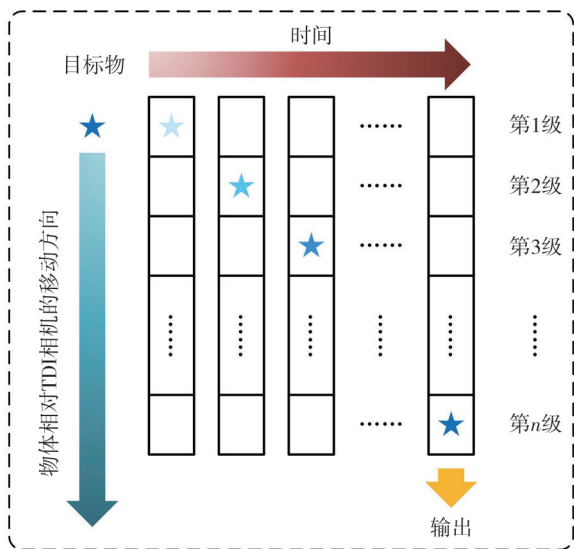
虽然上述研究能够有效去除图像中的伪影,提升图像的分辨率,但忽略了相机曝光时长对图像的影响。在相机参数中,曝光时长是影响图像亮度与伪影的重要参数之一。由于多数 TDI-CCD 传感器的初始曝光时长随行周期的改变而变化,导致用户忽视了对该参数的调整。在速度失配情况下,图像中的目标物会产生伪影,过长的曝光时长会加剧这种伪影效应,甚至过曝,导致图像过饱和,影响观测。而过短的曝光时长会使图像信噪比降低,图像的整体亮度值下降,使用户无法通过图像获取目标信息。因此,在图像采集过程中,需要调整匹配的曝光时长参数,以尽可能减小图像伪影与亮度对观测带来的影响。在对曝光时长参数优化方面,研究成果相对较少。何春良等<sup>[20]</sup>提出采用调制传递函数 $\times$ 信噪比为评价指标,通过联合两种评价指标公式获取最优曝光时长。但该方法仅针对 TDI-CMOS 的行滚筒曝光读出原理,并不适用于 TDI-CCD,同时并未采用数值优化算法对参数优化,限制了其应用范围。Huang等<sup>[21]</sup>提出了一种应用范围较广的曝光时长优化方法,根据相机采集的前  $N$  级数据作为基础,以中值灰度值作为目标调整确定合适的曝光参数。但该方法需要获取成像时相机每一级的灰度数据,增加了对相机采集数据的需求,并不适用于市面上已经集成完备的 TDI-CCD 相机。Li等<sup>[22]</sup>提出了一种基于 TDI-CCD 电荷转移和随机曝光的协同编码方法,该方法基于压缩感知理论建立了正交双探测器超分辨率成像系统,实现

了二维图像分辨率的提高,但算法在每次编码过程中采用固定曝光时长,并未针对曝光时长优化进行算法设计。

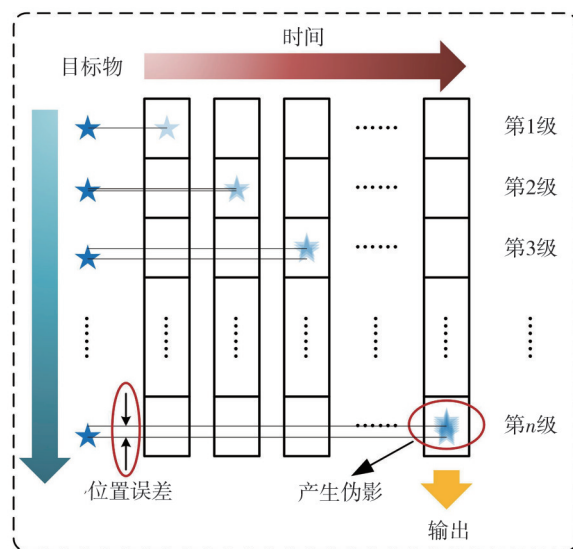
针对上述问题,本文提出一种TDI-CCD的曝光时长优化方法,基于TDI-CCD成像原理,构建了TDI-CCD的成像数学模型。针对不同速度失配情况下的图像,采用基于梯度的算法对曝光时长参数进行优化,获取其对应的优化曝光时长,从而弥补图像缺陷,提升图像质量。

### 1 曝光时长对像质影响分析

TDI-CCD传感器是由多级线阵列传感器组合而成的面阵列传感器,每一级线阵列沿着图像传感器的一条方向排列,并且通常与目标物运动方向垂直。当拍摄对象在TDI-CCD传感器的可探测范围内移动时,传感器阵列会按照不同阶段逐渐积累图像信息。在一段时间内,同一级传感器上每个像素都可以获取目标物信号,然后将这些信号传递到下一级相邻的像素,最终形成整个图像,如图1(a)所示。从图中可以看出,在相机行周期固定的情况下,物体与相机之间的相对运动速度对目标物的成像质量至关重要。当运动速度与相机行周期相匹配时,可以得到高质量目标成像。而当二者不匹配时,相机每一级的像素将获取非同一物点的目标信号,如图1(b)所示,图中目标物五角星与TDI-CCD相机之间的相对运动速度与相机行周期不匹配(也称为速度失配),导致每一级获取的信息均具有位置误差。在叠加之后,非同名点相互交错,产生伪影效应。



(a) 速度匹配模式



(b) 速度失配模式

图 1 TDI-CCD的工作模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the working mode of TDI-CCD

消除因速度失配产生的伪影有多种方案,但大部分均通过图像处理这种后端处理方式完成伪影去除,忽略了从前端图像采集过程改善图像质量。根据TDI-CCD的成像原理,CCD每行的数据处理方式为感光元件曝光,光子被光敏元件吸收并转换为电荷,从而完成光信号转化为电信号的功能。随后,这些电荷被存储于CCD寄存器中。在下一级曝光并完成电荷转移至寄存器后,上一级寄存器中的电荷也被转移至下一级,实现电荷的累加。根据TDI的工作模式,可以构建如图2所示的行切换模型。图2中,每一级所需的工作时长为行周期,表示从该级别传感器工作开始到下一级别传感器工作开始的用时。通过设定行周期时间的方式,保证每一级传感器的工作时长相同,且行周期与行频成反比。在一个行周期中,曝光时长占据一部分时间,如图2中的高电平阴影部分所示,其余时间则为信号从一级转移到下一级的转移时间。

根据图2中的模型可知,在行周期固定的情形下,也可以通过调整曝光时长来改变整体图像质量。在速度失配的情况下,图像中易出现伪影,过长时间的曝光会突显这种伪影现象,而短时长的曝光会导致图像亮度不足,影响观测。因此,从理论上来说,曝光时长存在一个极值点,使得能够在尽可能提升图像信噪比的状况下,降低图像中的伪影信号强度。寻找最优曝光时长也便于在后期图像处理的伪影去除过程中,对图像质

量进一步提升。

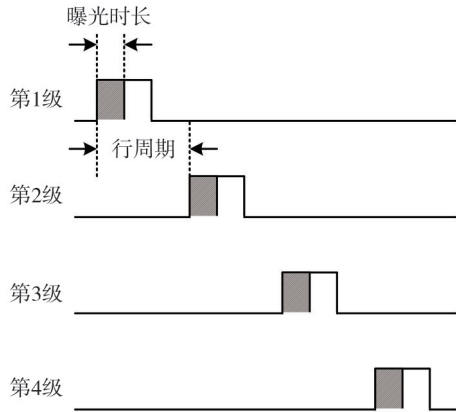


图2 TDI成像的行切换模型

Fig. 2 Line switching model for TDI imaging

## 2 曝光时长优化方法

针对 TDI-CCD 的曝光时长优化问题, 本文通过分析传统成像传感器的成像方式, 并结合 TDI 的成像模式, 构建关于 TDI-CCD 的成像模型。在此基础上进行曝光时长参数的优化。在 TDI-CCD 中, 光照射至某一级 CCD 时, 在栅极附近的半导体内部产生电子-空穴对, 其中多数载流子被栅极电压排斥, 少数载流子被吸收在势阱中形成光电信号电荷。针对成像传感器来说, 曝光时长与像素灰度值之间的关系通过光子流速率、光电荷量以及成像构成, 其中光子流速率表示为

$$\Delta N_{e\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Phi_{e\lambda}}{h\nu} d\lambda, \quad (1)$$

式中:  $\Delta N_{e\lambda}$  为入射光的光子流速率;  $\Phi_{e\lambda}$  为入射光谱辐射通量;  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  为 CCD 可探测入射光的光谱上限与下限;  $h\nu$  为一个光子的能量;  $h$  为普朗克常数(约  $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ );  $\nu$  为光的频率, 该频率可根据光的平均波长获取。根据光子流速率, 可获取累加的光电荷量为

$$Q = \eta \cdot q \cdot \Delta N_{e\lambda} \cdot A \cdot t, \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为 CCD 半导体材料的量子效率;  $q$  为电子电荷量(约  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ );  $A$  为光敏单元的受光面积;  $t$  为曝光时长。光电荷量与图像像素灰度值之间为正相关性, 即随着光电荷量的增多, 像素灰度值也会相应提升。因此, 可构建近似公式表示二者之间的关系为

$$I \approx ADC(G \cdot Q), \quad (3)$$

式中:  $I$  为图像的像素灰度值;  $G$  为放大系数;  $G \cdot Q$  可以得到放大的电压信号, 随后经过模数转换

过程 ADC 得到最终的像素灰度值。由于模数转换过程将连续信号转变为离散信号, 该过程导致函数不可导。为了在随后的过程中使用基于梯度的优化方法, 此处可采用近似处理手段。在不考虑模数转换的量化误差情况下, 像素的灰度值为

$$I \approx \frac{G \cdot Q \cdot 2^M}{V_{FS}}, \quad (4)$$

式中:  $2^M$  为图像的灰度分辨率;  $V_{FS}$  为满量程电压。综合式(2)~式(4)可构建传统 CCD 传感器的成像模型为

$$I = G \cdot 2^M \cdot q \cdot \Delta N_{e\lambda} \cdot A \cdot t / V_{FS}. \quad (5)$$

由式(5)可知, 在忽略模数转换的量化误差情况下, 像素的灰度值  $I$  与曝光时长  $t$  成线性关系。此处默认像素灰度值未超越传感器可承载的最大灰度值。在 TDI 模式下, 时间有延迟积分效应, 随着 TDI 相机中级数的累积, 目标物的灰度值会增加。在 TDI-CCD 相机中, 对目标物某一物点成像的灰度值可以表示为

$$I_i = \sum_{j=0}^{N-1} I_{i-j}, \quad (6)$$

式中:  $I_i$  为最终的像素灰度值;  $i$  为当前所在行;  $N$  为当前累加的总行数, 此时  $i = N$ 。假设当  $i = 10$  时,  $I_i = I_{10} + I_9 + \dots + I_2 + I_1$ , 即  $I_i$  为前 10 行所成像累加之和。则图像传感器的最终图像像素灰度值可以表示为

$$I_i = \frac{G \cdot 2^M}{V_{FS}} \cdot \sum_{j=0}^{N-1} Q_{i-j}. \quad (7)$$

根据式(7)可知, 最终生成的图像与每一级图像的叠加结果相关。若每一级像素点所成像目标物非同一物点, 则叠加后会造成失真。将失真后的线阵列图像拼接, 则会呈现具有伪影模糊的图像。在行周期已经固定的情况下, 相机与物体之间的相对运动速度能够决定最终生成的图像亮度与伪影。相对的, 在运动速度固定的前提下, 不同的行周期也会影响成像的亮度与伪影。当速度匹配时, 成像的像素灰度值可表示为

$$\hat{I}_i = \frac{G \cdot 2^N}{V_{FS}} \cdot \sum_{j=0}^{N-1} \hat{Q}_{i-j}, \quad (8)$$

式中:  $\hat{I}_i$  为速度匹配时的成像像素灰度值;  $\hat{Q}$  为速度匹配时每一级累加的电荷。 $\hat{I}_i$  可通过调整相机与目标物之间的相对运动速度, 获取速度匹配状态下的图像灰度值。而速度失配的图像获取方法可在上述基础上, 保证相机行频不变, 更改相机

与目标物之间的相对运动速度，产生失配效应。再根据峰值信噪比的表达式，希望通过改变曝光时长，使得存在速度失配情况的成像更接近于参考成像。在数值优化算法当中，常以当前信号值与标准信号值的  $F$  范数构建代价函数。将这一思想引入 TDI-CCD 曝光时长优化的过程当中，以速度匹配状态下的图像作为标准，可构建代价函数

$$F(t) = \|I_f - \hat{I}_f\|_F^2, \quad (9)$$

式中： $\|\cdot\|_F^2$  为求该表达式  $F$  范数的平方。通过图 2 与式(8)可以看出，最终成像与 TDI-CCD 相机的行周期无关，而与曝光时长相关。这一结论也可在实际经验中获取，即当速度匹配的情况下，无论行周期的大小是多少，只要曝光时间相同，其最终成像结果是相同的。因此，在获取速度匹配状态下图像的过程中，可采用行周期时长较长的状态采集图像，以更容易地获取清晰的目标物图像作为参考图像。由于代价函数  $F$  与图像像素灰度值  $I$  均为曝光时长  $t$  的函数，如式(5)与式(9)所示。因此，可将式(9)构建为一个优化问题，如式(10)所示。

$$\hat{t} = \underset{t}{\operatorname{arg\,min}} F(t), \quad (10)$$

式中： $\hat{t}$  为优化后的曝光时长。通过使用梯度下降算法求解该优化问题，可以获取速度失配下的最优曝光时长。在优化过程中，曝光时长  $t$  的更新可采用式(11)求解。

$$t^{i+1} = t^i - \operatorname{step}_t \cdot |\nabla F|_t, \quad (11)$$

式中： $\operatorname{step}_t$  为曝光时长优化步长； $|\nabla F|_t$  为代价函数  $F$  对  $t$  求导； $i$  为迭代过程中的计数。

### 3 实验结果与分析

本实验采用 PH4KCL-200KT 型 TDI-CCD 相机获取目标场景的灰度信息。该相机行像素分辨率可达 4K，积分级数为 256 级，以线扫描方式获取图像信息。为了提供目标物与相机之间的相对运动速度，实验中，将相机固定于支架上进行俯视拍摄。目标物放置于可移动传送带上，通过传送带给目标物运动速度，从而实现相机与目标物之间的相对运动。当相机设定行周期与目标物体运动速度相匹配时，可获取目标物的清晰图像，否则目标物体的成像上会存在伪影。随后可采用图像采集装置获取目标物体的成像信息，实验平台如图 3 所示。

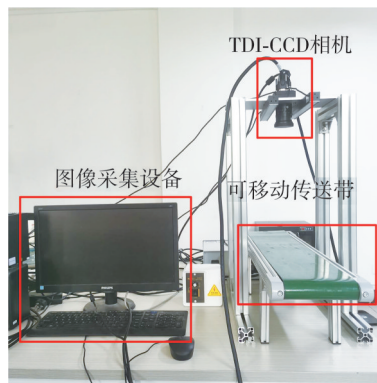
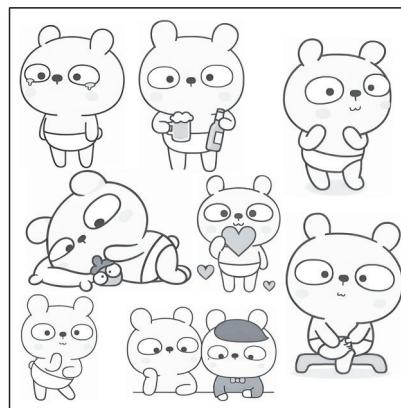


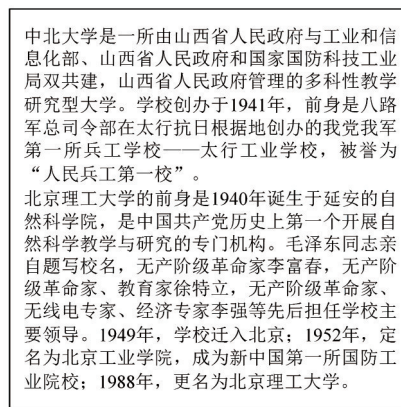
图 3 TDI-CCD 成像实验平台

Fig. 3 TDI-CCD imaging experimental platform

为方便实验进行，本实验选取带有图案的平面物体进行图像采集。实验选取“卡通人物”和“文字信息”图案作为被拍摄目标物，如图 4 所示。



(a) 卡通人物



(b) 文字信息

图 4 被拍摄目标物

Fig. 4 Target objects being photographed

由于“卡通人物”高频细节信息较少，对速度失配的容忍度较高，因而可接受较大范围的行周期调整；而“文字信息”高频细节较为丰富，对速度失配的容忍度较低，因而相比于“卡通人物”，

可调整行周期范围较小。根据两种目标物体的特性,在实验中分别给定偏离参考图像行周期较大与较小的测试行周期,保证在速度失配状态下仍然具有目标物的大致轮廓,而非完全无法识别。

实验设置初始行周期为  $150\ \mu\text{s}$ ,其中初始曝光时长为  $130\ \mu\text{s}$ ,在该条件下获取速度匹配的图像作

为参考图像。随后,保持相机与目标物相对运动速度不变,改变相机的行周期为  $100\ \mu\text{s}$ 和  $200\ \mu\text{s}$ ,并采集图 4(a)所示的“卡通人物”图像信息。最后,根据本文第 2 节介绍的曝光时长优化方法,获取优化后的曝光时长,并根据优化后的曝光数据再次获取成像结果,实验与仿真结果如图 5 所示。

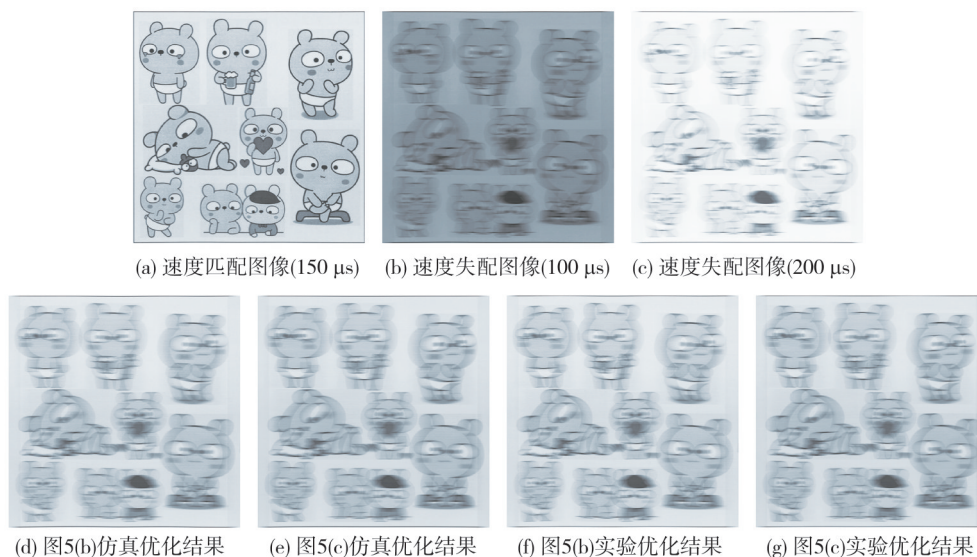


图 5 针对目标物“卡通人物”的仿真及实验结果。

Fig. 5 Simulation and experimental results for the target object “cartoon characters”

图 5(a) 为行周期  $150\ \mu\text{s}$  时采集的图像,该图像与运动速度匹配,图案的成像结果较为清晰,因此,以该图像作为参考图像。图 5(b) 与 (c) 分别表示行周期为  $100\ \mu\text{s}$  与  $200\ \mu\text{s}$  时相机采集的图像,其对应的初始曝光时长为  $80\ \mu\text{s}$  与  $180\ \mu\text{s}$ ,图标中括号内为图像对应的行周期。由于此时行周期与运动速度不匹配,成像时会产生伪影。同时,曝光参数不匹配亦会造成成像结果与参考图像有较大差异。采用式(10)获取优化后的曝光时长,并根据该曝光时长获取对应的仿真成像结果与实验成像结果。针对行周期为  $100\ \mu\text{s}$  的成像,由于行周期较短,曝光时间也对应较短,因此成像结果较暗,需要增加曝光时长以匹配参考图像曝光量。仿真与实验结果如图 5(d) 与 (f) 所示,可以观察到相比于原始成像结果(图 5(b)),优化后的两幅图像亮度更接近于参考图像。针对行周期为  $200\ \mu\text{s}$  的成像结果,由于行周期较长,对应曝光时间也较长,因此成像结果较亮。若继续增加曝光时长会造成过曝,并且导致伪影信息更加明显,无法识别目标物信息,因此,需要减小曝光时长以匹配参考图像的曝光量。其对应仿真与实验结果如图 5(e) 与 (g) 所示,根据优化后的曝光

参数,两幅图像的亮度有所降低,更接近于参考图像。

图 6 展示了对“文字信息”的不同行周期下的成像结果。采用行周期为  $150\ \mu\text{s}$  情况下的成像为参考成像(如图 6(a) 所示)。并在该运动速度下,对  $120\ \mu\text{s}$  和  $180\ \mu\text{s}$  行周期的目标物进行成像,其对应的初始曝光参数为  $100\ \mu\text{s}$  与  $160\ \mu\text{s}$ 。与图 5 的展示结果类似,在行周期较短的情况下,由于对应曝光时长较短,图像呈现较暗的效果;而在行周期较长的情况下,对应曝光时间也较长,图像呈现较明亮的效果。此外,由于两种情况都为处于速度失配情况下的成像,因此,图像中均具有伪影现象。根据第 2 节提出的方法对图 6(b) 和 (c) 进行曝光时长的优化,得到对应的仿真结果(如图 6(d) 和 (e) 所示)和实验结果(如图 6(f) 和 (g) 所示)。通过对比优化后的图像与参考图像,可知优化后的图像亮度更接近于参考图像。

为了定量对比优化效果,本文采用 PSNR 作为定量评价指标,分别对“卡通人物”以及“文字信息”两种目标物进行对比分析<sup>[23]</sup>。表 1 中的对比信息包含优化前图像、仿真优化后成像以及实验优化后成像的 PSNR 数据对比。

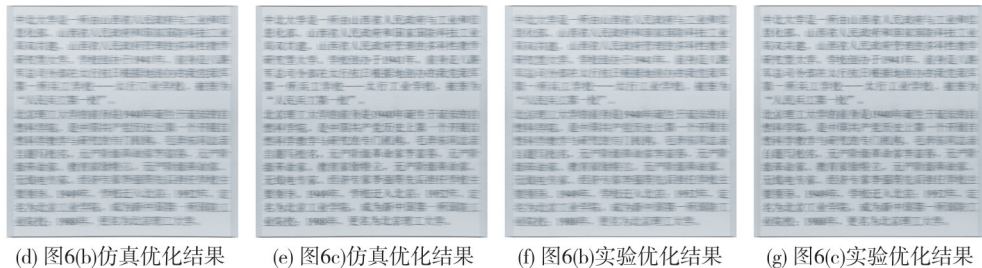
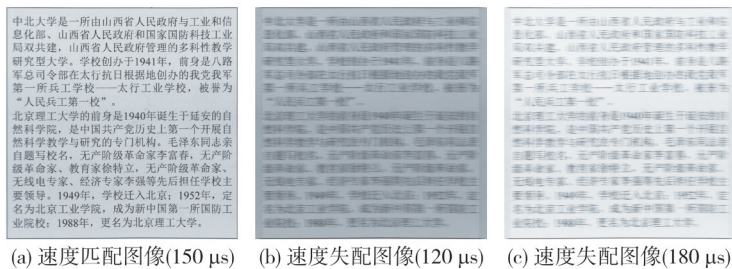


图 6 针对目标物“文字信息”的仿真及实验结果。

Fig. 6 Simulation and experimental results for the target object “text information”

表 1 不同实验场景成像的 PSNR 对比结果

Tab. 1 Comparison results of PSNR for imaging in different experimental scenarios

实验对象	操作	图像	曝光时长/ $\mu\text{s}$	PSNR
卡通人物	优化前	5(b)	80.00	14.47
	优化前	5(c)	180.00	13.96
	仿真优化	5(d)	120.73	21.33
	仿真优化	5(e)	130.87	21.23
	实验优化	5(f)	120.73	21.18
	实验优化	5(g)	130.87	21.06
文字信息	优化前	6(b)	100.00	16.56
	优化前	6(c)	160.00	16.24
	仿真优化	6(d)	124.53	19.55
	仿真优化	6(e)	130.52	19.99
	实验优化	6(f)	124.53	19.59
	实验优化	6(g)	130.52	19.70

对比表 1 优化前和优化后的结果可以发现, 根据本文提出的方法, 可以有效提升成像的 PSNR。对于目标物“卡通人物”, 成像质量提升约 50%; 对于目标物“文字信息”, 成像质量提升约 20%。提升幅度表明测试行周期偏离参考行周期越大, 其图像亮度与图像伪影偏离参考图像越远, PSNR 可提升潜力越大。根据优化前后的结果也可以看出, 高频信息较少的“卡通人物”受伪影影响程度较小, 受图像亮度影响程度较大; 而高频信息较多的“文字信息”受伪影影响程度较大, 受图像亮度影响程度较小。这一现象也表明, 针对于高频信息较少的图像, 优化曝光时长的效果要更加明显。对比仿真优化结果与实验优化结果, 可以看出两种方式得到的 PSNR 基本相同, 这也从另一个角度印证了本文所构建成像模型的正确性。此外, 观察到行周期为 100  $\mu\text{s}$  与

120  $\mu\text{s}$  情况下, 曝光时长优化的结果超出了其对应行周期时长。这是因为本文旨在获取最优的曝光时长, 而未根据行周期对曝光时长进行限制。当曝光时长超过行周期时, 若要达到对应曝光时长的效果, 可通过提升数字增益来近似弥补曝光时长的不足。根据图像亮度理论, 在实验环境不变的情况下, 图像的亮度受光圈大小、曝光时长以及数字增益控制<sup>[24]</sup>。在光圈大小固定的情况下, 尽管数字增益的提升可能会放大噪声影响, 但在曝光时长或数字增益增长倍数相同的情况下, 图像整体亮度的改变基本相同<sup>[25]</sup>。因此, 在实验过程中, 可通过调整数字增益近似达到调整曝光时长的效果。若未对数字增益做出改变, 则实验可达到的最优曝光时长约等于行周期。最后, 观察两个场景的优化图像与 PSNR 数值结果可以看出, 尽管优化了曝光时长参数, 图像中依然存在伪影, PSNR 也依然有可优化空间。其原因在于曝光时长仅能在一定程度上降低伪影对图像的影响, 并不能完全去除伪影。因此, 本文提出的方法限于在图像采集端对图像质量进行补偿, 后续还需要配合图像处理方式对伪影效应进行进一步修正。

### 4 结 论

本文提出一种针对 TDI-CCD 相机成像的曝光时长优化方法, 从相机参数调整方向改善因速度失配带来的图像质量下降问题。通过构建 TDI-CCD 成像模型, 从理论层面推导曝光时长对成像

的影响。基于成像模型,构建最优化问题,并采用基于梯度的算法对曝光时长进行优化。最后通过仿真与实验方式证明了本文提出模型与方法的正确性,结果证明本文方法能够有效提升 TDI-CCD 在速度失配条件下的成像质量。但由于改变曝光参数对图像伪影修正带来的改变较少,需要针对这一问题进行进一步的图像处理。因此,未来的研究工作将致力于在速度失配条件下,结合曝光参数优化与图像处理手段,去除 TDI-CCD 成像中的伪影,进一步提升成像质量。

### 参考文献:

- [1] LEPAGE G, BOGAERTS J, MEYNANTS G. Time-delay-integration architectures in CMOS image sensors[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(11): 2524-2533.
- [2] 张明宇, 赵变红. TDI CCD 相机图像采集与处理技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [3] 汪巧萍, 齐文雯, 谭伟. 航天 TDI 推扫式光学遥感器机动成像质量[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(10): 284-291.  
WANG Qiaoping, QI Wenwen, TAN Wei. Maneuvering imaging quality of space TDI push scan optical remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 284-291. (in Chinese)
- [4] LIU S, ZHANG H, TONG X, et al. Effect of the matching window size and TDI stage number on image-based satellite jitter detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 6508805.
- [5] 赵嘉鑫, 张涛, 杨永明, 等. TDI-CCD 全景航空相机的像移速度场计算模型研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 269-276.  
ZHAO Jiixin, ZHANG Tao, YANG Yongming, et al. Image motion velocity field of TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 269-276. (in Chinese)
- [6] 张刘, 齐晓蕊, 李桂阳, 等. 利用双域推扫成像方法检测对地遥感目标[J]. *宇航学报*, 2024, 45(4): 638-646.  
ZHANG Liu, QI Xiaorui, LI Guiyang, et al. A two-region push-broom imaging method for remote sensing moving object detection [J]. *Journal of Astronautics*, 2024, 45(4): 638-646. (in Chinese)
- [7] LI M, ZHANG Z, CHEN S, et al. Imaging simulation and learning-based image restoration for remote sensing time delay and integration cameras [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5617817.
- [8] 杜言鲁, 丁亚林, 许永森, 等. TDI-CCD 全景式航空相机对地目标定位的算法[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 355-365.  
DU Yanlu, DING Yalin, XU Yongsen, et al. Geolocation algorithm for TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 355-365. (in Chinese)
- [9] 高静, 王雪, 王立辉, 等. 管道环焊缝 X 射线数字成像动态采集软件设计[J]. *管道技术与设备*, 2021(1): 58-62.  
GAO Jing, WANG Xue, WANG Lihui, et al. Design of dynamic acquisition software for X-ray digital imaging of pipe girth welds [J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2021(1): 58-62. (in Chinese)
- [10] JO Y R, HONG S K, KWON O K. A tileable CMOS X-ray line detector using time-delay-integration with pseudomultisampling for large-sized dental X-ray imaging systems [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 64(1): 211-216.
- [11] 黄巧林. 航天光学遥感器 CCD/CMOS 光电成像技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021.
- [12] 周春平, 宫辉力. 多模态传感器基元程控成像技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [13] 徐立军, 李小路. 遥感平台运动误差表征与成像像质退化 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [14] PAN Y, LIU B, YAN W, et al. Synthetic aperture imaging beyond foreground using image matting [J]. *Sensing and Imaging*, 2019, 20(1): 24.
- [15] PAN J, YE G, ZHU Y, et al. Jitter detection and image restoration based on continue dynamic shooting model for high-resolution TDI CCD satellite images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 59(6): 4915-4933.
- [16] ZHU Y, YANG T, WANG M, et al. Rigorous parallax observation model-based remote sensing panchromatic and multispectral images jitter distortion correction for time delay integration cameras [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5620919.
- [17] 石俊霞, 郭永飞, 薛旭成, 等. 航天时间延迟积分 CCD 相机振动模糊图像的恢复 [J]. *光电子激光*, 2012, 23(3): 572-578.  
SHI Junxia, GUO Yongfei, XUE Xucheng, et al. Motion blurred image restoration of spaceborne TDICCD camera [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, 23(3): 572-578. (in Chinese)

- [18] YU H, QIAN X, GUO M, et al. An antivibration time-delay integration CMOS image sensor with online deblurring algorithm [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, 26 (8): 1544-1554.
- [19] WANG D, ZHANG T, KUANG H. Clocking smear analysis and reduction for multi phase TDI CCD in remote sensing system [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (6): 4868-4880.
- [20] 何春良, 李斌桥, 刘振旺, 等. TDI CMOS 图像传感器曝光时间优化方法研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35 (2): 34-40.  
HE Chunliang, LI Binqiao, LIU Zhenwang, et al. Integration time optimization for TDI CMOS image sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (2): 34-40. (in Chinese)
- [21] HUANG J, LIU J, WANG X, et al. Research on the auto-exposure method of an aerial TDI camera based on scene prediction [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13 (22): 12411.
- [22] LI Y H, WANG X D, WANG Z. A novel super-resolution imaging method based on TDI CCD charge transfer and random exposure [J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 170-181.
- [23] HORE A, ZIOU D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM [C] // 2010 20th International Conference on Pattern Recognition, 2010: 2366-2369.
- [24] 闵武国. CCD 成像电子学系统自动曝光和自动增益研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [25] 杨臧健, 符泰然, 程晓舫, 等. 彩色数字摄像机控制参数影响的标定 [J]. *光学技术*, 2008, 34 (3): 375-378.  
YANG Zangjian, FU Tairan, CHENG Xiaofang, et al. Calibration for control parameters of digital color camera [J]. *Optical Technique*, 2008, 34 (3): 375-378. (in Chinese)