

# 全局快门 sCMOS 图像传感器数字 TDI 微光成像技术

张元涛<sup>1,2,3\*\*</sup>, 柴孟阳<sup>1,2</sup>, 孙德新<sup>1,2,3,4</sup>, 刘银年<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

<sup>2</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>4</sup>中国科学院上海技术物理研究所启东光电遥感中心, 江苏 启东 226200

**摘要** 为实现高分辨率大动态范围的空间微光 (LLL) 成像, 提出基于全局快门科学级互补金属氧化物半导体 (sCMOS) 图像传感器的数字域时间延迟积分 (TDI) 微光成像方法。通过推导数字域 TDI 成像数据处理方法, 建立了系统信噪比 (SNR) 模型, 提出了数字域 TDI 大动态范围成像方法, 并分析了速度失配导致的调制传递函数 (MTF) 退化现象。实验结果表明, 该方法能够明显提高微光成像质量, 当数字域 TDI 积分级数为 30 时, 系统 SNR 由未积分的 5.04 dB 提高到 19.78 dB, 动态范围比传统数字域 TDI 方法提升了 29.54 dB, 为实现高分辨率大动态范围空间微光成像提供了保障。

**关键词** 成像系统; 微光成像; 微光成像仪; 数字域时间延迟积分; 科学级互补金属氧化物半导体探测器; 动态范围

中图分类号 TN223

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0911001

## Digital TDI Technology Based on Global Shutter sCMOS Image Sensor for Low-Light-Level Imaging

Zhang Yuantao<sup>1,2,3\*\*</sup>, Chai Mengyang<sup>1,2</sup>, Sun Dexin<sup>1,2,3,4</sup>, Liu Yinnian<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technologies,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>4</sup>Qidong Optoelectronic Remote Sensing Center, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Qidong, Jiangsu 226200, China

**Abstract** In order to meet the demands of space imaging with high resolution and large dynamic range at low light level (LLL), digital domain time delay and integration (TDI) technology based on scientific complementary metal-oxide-semiconductor (sCMOS) image sensor with global shutter is proposed, and image data processing algorithm is deduced. Corresponding signal-to-noise ratio (SNR) model is established, dynamic range extension imaging method based on digital domain TDI is proposed, and modulation transfer function degradation due to velocity errors is analyzed. Experimental results show that the proposed method can significantly improve LLL image quality. System's SNR increases from 5.04 dB to 19.78 dB with 30 TDI stages, and dynamic range increases by 29.54 dB compared to traditional digital domain TDI method, which highlights the potential of the proposed method for space LLL imaging with high resolution and large dynamic range.

**Key words** imaging systems; low-light-level imaging; low-light-level imager; digital domain time delay and integration; scientific complementary metal-oxide-semiconductor sensor; dynamic range

**OCIS codes** 110.4280; 010.0280; 280.4788; 040.3780

收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-03-29; 录用日期: 2018-04-09

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0602103)、国家高分辨率对地观测系统重大专项(A0106/1112)

\* E-mail: ynliu@mail.sitp.ac.cn; \*\* E-mail: yuantaozhang222@163.com

# 1 引 言

星载微光成像系统可在低照度条件下获取可见光至近红外谱段的云图和地面特征资料,是监测夜间和晨昏时段低云大雾的有效手段。目前世界上仅有两个有效载荷可用于微光探测,分别是搭载于美国国防气象卫星(DMSP)的业务线扫描系统(OLS)和搭载于美国“国家极轨业务环境卫星系统准备项目”(NPP)的可见光红外成像仪/辐射计组<sup>[1]</sup>(VIIRS)。其中,OLS分辨率较低,动态范围较小;VIIRS的白天/夜晚波段(DNB通道)采用3片时间延迟积分(TDI) CCD设计,具有更高分辨率与更大动态范围成像能力,但TDI CCD积分级数固定,难以实现像素级调整,很难采用单片TDI CCD实现更高动态范围成像;另外,CCD集成度较低且工作电压高,需要多种电路完成CCD驱动控制与信息采集,无法实现高速、低噪声以及低功耗的设计目标<sup>[2]</sup>。因此,研究更高空间分辨率、更大动态范围、低功耗及小体积重量的星载微光成像系统具有重要意义。

CMOS图像传感器具有成本低、集成度高、速度快、系统设计简单和抗辐照能力强等特点,近年来逐渐应用于航天领域<sup>[3]</sup>。基于CMOS图像传感器的遥感系统推扫成像时探测器积分时间受空间分辨率限制,而采用TDI成像模式可以有效延长积分时间,因此,国内外学者深入研究了CMOS图像传感器的TDI成像方法。Mayer等<sup>[4]</sup>和Xu等<sup>[5]</sup>研制了类似于CCD电荷转移结构的TDI CMOS图像传感器,但制作传感器需要特殊的工艺,且电荷转移效率会限制TDI级数以及动态范围;Yu等<sup>[6]</sup>提出在模拟域实现TDI功能,同时在片上集成复杂的模拟电路校正穿轨方向振动导致的图像模糊,该方案牺牲了器件功耗与灵敏度性能;Lepage等<sup>[7]</sup>论述了数字域TDI的概念,陶淑苹等<sup>[8-9]</sup>开展了数字域TDI成像方法的研究,并验证了基于CMOS图像传感器数字域TDI方法的可行性;Xu等<sup>[10]</sup>采用高低增益像元融合的方法提升了TDI CMOS动态范围,该方法需要重新设计CMOS传感器像元,且其增益固定,无法依据目标照度灵活调整;Lan等<sup>[11]</sup>研究了数字域TDI CMOS高动态范围成像方法,采用数字图像处理方法使得图像的熵和平均梯度值最大化,获得了视觉效果良好的高动态范围图像,但该方法在量化应用中会受到限制。

为了兼顾灵敏度与动态范围性能,且考虑到仪

器的量化应用,需进一步研究数字域TDI CMOS成像系统的高信噪比(SNR)及大动态范围成像方法。因此,本文分析TDI成像模式对图像传感器的需求,推导了数字域TDI图像处理方法;对数字域TDI成像系统SNR模型进行建模与验证,研究了提升动态范围的方法及调制传递函数(MTF)退化现象;利用搭建的模拟推扫成像装置,完成了微光条件下数字域TDI推扫成像与分析。

## 2 数字域 TDI 微光成像原理

### 2.1 时间延迟积分用于微光成像的必要性

在星载推扫成像系统中,探测器的工作频率 $f_r$ 计算公式为

$$f_r = \mu^{1/2} R / [D_g (R + H)^{3/2}], \quad (1)$$

式中 $\mu$ 为地球引力常数, $R$ 为地球半径, $H$ 为卫星相对于地球表面的轨道高度, $D_g$ 为仪器的地面分辨率, $H$ 和 $D_g$ 确定之后,像素周期也随之确定,基于CMOS或者CCD成像系统的积分时间受限于像素周期,因此系统SNR也受到限制。采用TDI成像模式可在满足空间分辨率的条件下提升系统SNR,进而有效消除SNR与空间分辨率之间的矛盾。对于星载微光成像系统,系统SNR直接决定了系统性能,因此,TDI成像方式是星载高分辨率微光成像系统的有效方案。

### 2.2 对图像传感器的需求

实现数字域TDI需采用面阵图像传感器,成像系统推扫的方向为TDI方向,其像元个数决定了最大TDI阶数,穿轨方向为空间维,其决定系统成像幅宽。在TDI成像过程中,图像传感器帧周期为系统扫描行周期,根据(1)式,给定轨道高度时,空间分辨率越高要求图像传感器的工作帧频也越高,因此,实现高分辨率数字域TDI微光成像需采用高帧频成像器件。

由于采用面阵图像传感器,因此需要分析传感器快门方式,以便选择匹配TDI成像模式的快门方式。面阵科学级CMOS(sCMOS)图像传感器快门方式有全局快门和卷帘快门两种,其中,全局快门曝光时探测器所有像元同时开始和停止积分,这种快门方式要求像元具有存储信号、全局复位和全局电荷转换的功能。

卷帘快门sCMOS图像传感器行与行之间开始积分时刻相差一行读出时间 $T_{line}$ ,用于 $M$ 阶数字域TDI成像模式时,同一目标相邻两次积分的开始时刻相差为

$$\Delta T = T_{\text{line}}, \quad (2)$$

第一级与最后一级开始积分时刻相差

$$\Delta T_{\text{total}} = (M - 1) \cdot T_{\text{line}}. \quad (3)$$

采用 TDI 成像模式时,像元曝光周期要与目标运动速度同步,否则系统无法准确获取目标多次曝光值,累加后会使得系统 MTF 退化。另外,如果成像系统有穿轨方向的干扰,卷帘快门工作模式会额外引入空间畸变,降低图像质量。因此,用于数字域

TDI 成像模式的 sCMOS 图像传感器需具备全局快门工作模式。

### 2.3 实现方法

采用 sCMOS 图像传感器实现数字域 TDI 成像方式的前提是器件工作时序与系统运动速度同步。以 3 阶 TDI 成像为例,全局快门 sCMOS 图像传感器数字域 TDI 成像方法的成像原理如图 1 所示<sup>[7]</sup>。

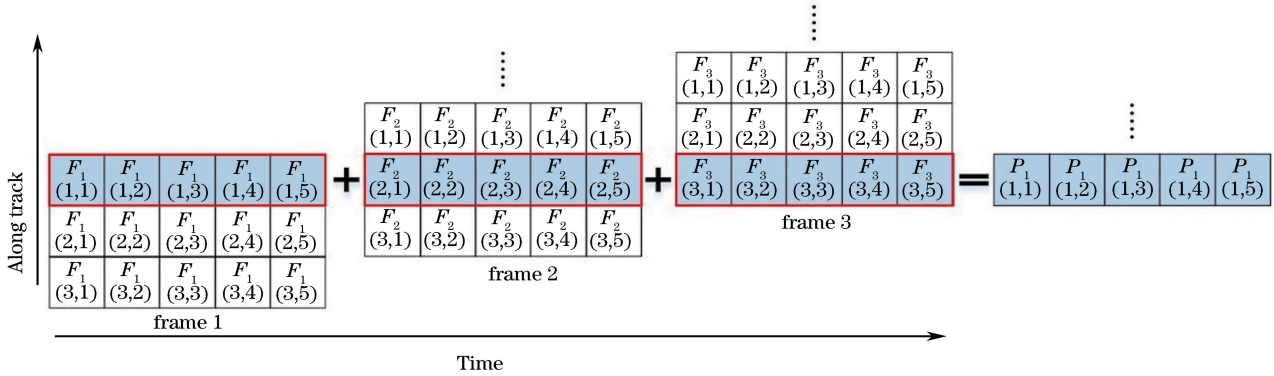


图 1 全局快门 sCMOS 图像传感器 TDI 成像原理

Fig. 1 TDI imaging principle of global shutter sCMOS image sensor

图 1 中横轴为时间,纵轴为 TDI 方向,一个像素完整的成像周期为 3 个探测器工作周期,成像系统在 TDI 方向运动 3 个像素距离,共获取 3 帧图像数据,分别为 Frame1、Frame2 和 Frame3。其中,  $F_1(1,j)$ 、 $F_2(2,j)$ 、 $F_3(3,j)$  分别对应目标第一次、第二次和第三次曝光值,将三次曝光值累加,可得到此目标的 TDI 像素值为

$$P_1(1,j) = F_1(1,j) + F_2(2,j) + F_3(3,j), \quad (4)$$

式中  $j$  表示图像传感器列号。推广到  $M$  阶数字域 TDI 成像,可得到  $M$  阶数字域 TDI 像素值为

$$P_k(i,j) = F_k(i,j) + F_{k+1}(i+1,j) + \dots + F_{k+M-1}(i+M-1,j), \quad (5)$$

式中  $P_k(i,j)$  为目标第  $k$  行像素  $(i,j)$  的像素值,  $F_k(i,j)$  为全局快门 sCMOS 图像传感器获取的第  $k$  帧图像像元  $(i,j)$  的信号值。

(5)式给出了成像原理,可以用于处理数字域 TDI 成像图像,但是该算法资源占用较多,不适合实际工程使用。依据图 1 可以推导出适合工程应用的数字域 TDI 图像处理办法,采用公式表示为

$$P(k-m+1,j) = P(k-m+1,j) + F_k(m,j), \quad 1 \leq m \leq M, 1 \leq j \leq N \forall k \geq m, \quad (6)$$

式中  $P(k-m+1,j)$  为目标第  $(k-m+1,j)$  个像素数字量化值(DN),  $F_k(m,j)$  为 sCMOS 图像传

感器获取第  $k$  帧图像数据中像元  $(m,j)$  的 DN 值。该方法占用较少资源即可完成数字域 TDI 图像处理。

## 3 数字域 TDI 微光成像系统特性分析与测试

为了分析数字域 TDI 成像特性,首先研究系统 SNR。用于获取测试数据的成像系统为基于 sCMOS 图像传感器设计的微光成像仪,均匀光信号采用微光积分球输出,成像系统参数如表 1 所示,其中  $e^-$  表示等效电子数。

表 1 sCMOS 图像传感器微光成像系统参数

Table 1 System parameters of low-light-level imaging system

Parameter	Value
Pixel size / ( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	$6.5 \times 6.5$
Array size / (pixel $\times$ pixel)	$1024 \times 500$
Peak quantum efficiency	$\geq 0.55$
$F \#$	1.4
System noise / $e^-$	2
Quantization / bit	16

### 3.1 灵敏度分析与测试

假设目标特性满足朗伯定律,基于 sCMOS 图像传感器微光成像系统接收目标反射的微弱光信号<sup>[12]</sup>,在每个像元上产生的光生电子数为  $N_s$ ,根据成像系统信号传输模型<sup>[13]</sup>,将系统产生的信号电子

数转换为最终的 DN 值,即

$$N_{DN} = [(N_s \cdot q_e / C_{node}) \cdot G_{PGA} \cdot 2^{B_{bit}}] / V_{ref}, (7)$$

式中  $C_{node}$  为 sCMOS 图像传感器读出电路节点电容,  $G_{PGA}$  为 sCMOS 图像传感器读出电路及可编程增益放大电路 (PGA) 增益,  $B_{bit}$  为模拟数字转换器 (ADC) 量化位数,  $V_{ref}$  为 ADC 参考电压,  $q_e$  为电子电量。

sCMOS 图像传感器微光成像系统时间噪声包括光子噪声、暗电流噪声、复位噪声、读出放大器低频噪声和宽带白噪声以及后端电子学噪声。通常后端电子学量化噪声相对于系统其他部分噪声可以忽略不计,因此,系统输出总噪声 DN 值可以表示为

$$n_{DN} = \sqrt{n_{DN_s}^2 + n_{DN_d}^2 + n_{DN_{rst}}^2 + n_{DN_{read}}^2}, (8)$$

式中  $n_{DN_s}$  为光子噪声 DN 值,  $n_{DN_d}$  为暗电流噪声 DN 值,  $n_{DN_{rst}}$  为复位噪声 DN 值,  $n_{DN_{read}}$  为读出电路噪声 DN 值。

根据(5)式和(7)式可以得出  $M$  阶数字域 TDI 成像系统获取的信号 DN 值为

$$N_{M\_DN} = M \cdot N_{DN} =$$

$$M [(N_s \cdot q_e / C_{node}) \cdot G_{PGA} \cdot 2^{B_{bit}}] / V_{ref}, (9)$$

式中  $N_{M\_DN}$  为数字域 TDI 成像系统输出信号 DN 值。

根据系统噪声模型可知,  $M$  阶数字域 TDI 输出噪声为

$$n_{M\_DN} = \sqrt{M} \cdot n_{DN} = \sqrt{M} \cdot$$

$$\sqrt{n_{DN_s}^2 + n_{DN_d}^2 + n_{DN_{rst}}^2 + n_{DN_{read}}^2}, (10)$$

(10)式假设不同级数噪声值都相同,实际上,具有列读出电路的 sCMOS 图像传感器不同行的噪声也不完全相同,但是当误差较小时,可以利用(10)式较准确地估算噪声性能。图 2 所示为系统输出噪声 DN 值与 TDI 级数的关系,图中离散点为实测系统噪声值,实线为指数拟合值,拟合指数为 0.505(理论值为 0.5)。

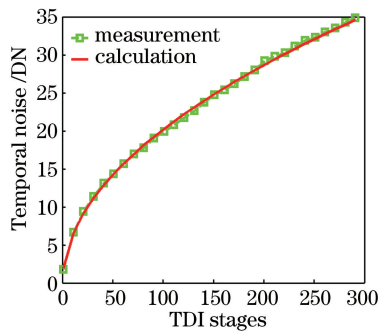


图 2 不同 TDI 阶数时系统噪声 DN 值  
Fig. 2 System temporal noise of TDI image with different stages

由图 2 可知,实测时间噪声较理论值偏大,这是因为理论分析忽略了 ADC 量化噪声的影响,同时 TDI 成像时像元之间具有一定的相关性,但是在工程应用中,误差的影响可以忽略不计。

在分析和测试数字域 TDI 成像系统信号和噪声特性的基础上,可以得出  $M$  级数字域 TDI 成像系统 SNR 计算公式为

$$R_{SN} = N_{M\_DN} / n_{M\_DN} = \sqrt{M} \cdot R_{SN0} = \sqrt{M} \cdot N_{DN} / \sqrt{n_{DN_s}^2 + n_{DN_d}^2 + n_{DN_{rst}}^2 + n_{DN_{read}}^2}. (11)$$

采用  $M$  阶数字域 TDI 成像模式时,系统 SNR 提升为原系统的  $\sqrt{M}$  倍。在实验室采集两种照度下的图像数据,使用不同阶数 TDI 进行处理,获得系统 SNR 实测值,并计算相应的理论值,所得结果如图 3 所示。

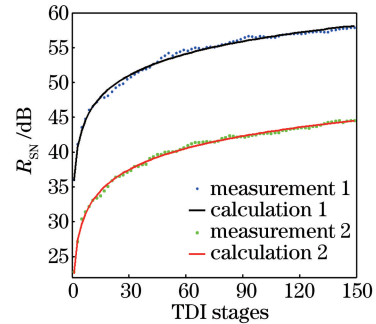


图 3 不同照度数字域 TDI 成像系统信噪比  
Fig. 3 SNR of TDI imaging system with different illumination

图 3 中两组实验数据与理论计算结果都非常吻合,证明了本文方法的可靠性以及数字域 TDI 成像方法的有效性。

### 3.2 高分辨率及大动态范围成像分析

在一定的轨道高度,同样系统参数下空间分辨率越高,系统 SNR 越小。SNR 是保证数据质量的重要性能指标,为了保证 SNR 性能,星载微光成像系统空间分辨率常低于其他时段和波段工作的光学成像系统。

由(11)式可知,采用  $M$  阶数字域 TDI 模式进行成像时,系统 SNR 可提升  $\sqrt{M}$  倍,因此,在相同的 SNR 指标要求下,  $M$  阶数字域 TDI 成像系统空间分辨率可提升到原系统的  $\sqrt{M}$  倍。以星载微光成像系统为例,假设系统工作轨道高度为 700 km,图像传感器穿轨方向像元个数为 2048,系统量化位数为 16 bit,原系统空间分辨率为

500 m,在系统 SNR 指标相同的条件下,计算系统空间分辨率与累加级数之间的关系,计算结果如表 2 所示。

从表 2 结果可以看出,在相同 SNR 下,系统空间分辨率随数字域 TDI 级数增加而增大,但是系统要求探测器工作帧频也相应增加,系统数据率进而增加,对数传系统的带宽需求也相应提高。

表 2 不同数字域 TDI 积分阶数星载成像系统空间分辨

Table 2 Space-borne imaging system resolution with different digital domain TDI stages

Parameter	Stage		
	1	10	30
Resolution /m	500	159	92
Frame rate /( $\text{frame} \cdot \text{s}^{-1}$ )	13.8	43.4	75
Data speed /( $\text{Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.452	14.221	73.728

除空间分辨率之外,动态范围也是成像系统重要的性能参数之一,尤其是星载微光成像系统更加期望获得大动态范围成像能力。基于 CCD 或者 CMOS 图像传感器的成像系统动态范围  $R_{DR}$  由探测器满阱容量以及读出噪声决定,即

$$R_{DR} = N_{FW} / n_{RD}, \quad (12)$$

式中  $N_{FW}$  为探测器满阱电子数,  $n_{RD}$  为读出噪声电子数。可见,系统动态范围受限于传感器动态范围,当目标场景动态范围大于器件动态范围时,系统无法同时获取具有高亮度目标与低亮度目标的图像数据,实现具备高 SNR 及大动态范围成像能力的系统较为困难。虽然传统 TDI 技术可以提高系统 SNR<sup>[8-9]</sup>,但在星载成像系统中,星上数传带宽及缓存容量都有限,系统获取的遥感图像数据需按照固定位宽及格式处理,图像数据最大 DN 值无法超过系统位宽,因此传统 TDI 成像系统动态范围为

$$R_{DR\_TDI} = 2^{B_{bit}} / (\sqrt{M} \cdot n_{RD}), \quad (13)$$

式中  $B_{bit}$  为系统数据位宽。由(13)式可知,系统动态范围随累加级数增大而减小,为了保证 SNR 必须保证  $M$  不减小,所以系统 SNR 和动态范围是矛盾关系,且难以取舍。然而,数字域 TDI 成像模式可以根据需要连续调整积分级数,因此,在保证高 SNR 条件下,可获得更大的动态范围,且对于场景中每个像素可以独立调整累加级数,进一步扩大系统动态范围。根据这种特性,可以在成像系统中设计一定条件,使得能量较低的像元累加级数增加,能量强的像元减少累加级数,等效于保持系统数据最大值不变,同时减小系统读出噪声,因此数字域 TDI 系统动态范围可以优化为

$$R_{DR\_TDI} = 2^{B_{bit}} / (n_{RD} / \sqrt{M}) = \sqrt{M} \cdot 2^{B_{bit}} / n_{RD}, \quad (14)$$

(14) 式表明系统动态范围比器件动态范围提升了  $\sqrt{M}$  倍,相比于传统 TDI 方法提升了  $M$  倍。以 16 bit 位宽为例,仿真比较传统 TDI 方法与本文方法采用不同积分级数时的系统动态范围,结果如图 4 所示。

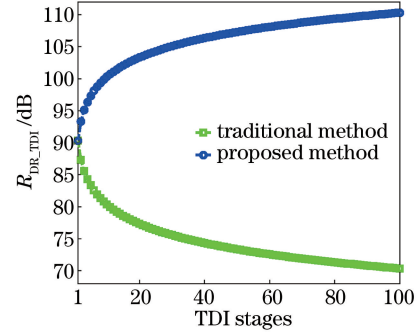


图 4 TDI 成像系统动态范围比较

Fig. 4 Comparison of TDI imaging system for dynamic range

从图 4 结果可以看出,传统 TDI 方法系统动态范围随积分级数增加而减小,而本文方法可以显著提升动态范围。

### 3.3 MTF 分析

光学成像系统成像质量受信噪比和调制传递函数共同影响<sup>[14]</sup>。虽然采用数字域 TDI 技术可以提高系统信噪比,但在实际成像过程中,TDI 累加操作对系统 MTF 影响很大,尤其是在探测器帧频与推扫速度失配的情况下,随着速度误差的增大,系统 MTF 会逐渐减小,因此,需要分析数字域 TDI 微光成像系统 MTF。

TDI 成像系统 MTF 主要包括光学系统传递函数  $f_{MT\_opt}$ 、探测器传递函数  $f_{MT\_dec}$ 、速度失配传递函数  $f_{MT\_err}$  及其他环境因素引入的传递函数  $f_{MT\_oth}$ , 则系统总的 MTF 值为<sup>[15]</sup>

$$f_{MT} = f_{MT\_sta} \cdot f_{MT\_dyn} = f_{MT\_opt} \cdot f_{MT\_dec} \cdot f_{MT\_err} \cdot f_{MT\_oth}, \quad (15)$$

假设在推扫成像过程中,探测器的积分时间固定,那么  $f_{MT\_opt}$  和  $f_{MT\_dec}$  就可以作为系统静态 MTF,环境因素导致的 MTF 退化属于不可控因素,因此,本文只对影响较大的  $f_{MT\_err}$  进行分析。

速度失配是由成像系统推扫速度与探测器成像频率非严格同步导致的。假设推扫引起的像移速度为  $V_p$ ,成像帧频对应的像移速度为  $V_f$ ,那么速度失配导致退化后 MTF 值为<sup>[15]</sup>

$$f_{MT\_err} = \frac{\sin [\pi f M d (V_p - V_f) / V_p]}{\pi f M d (V_p - V_f) / V_p} = \frac{\sin [\pi / 2 \cdot (f / f_N) \cdot M \cdot (V_p - V_f) / V_p]}{\pi / 2 \cdot (f / f_N) \cdot M \cdot (V_p - V_f) / V_p}, \quad (16)$$

式中  $f$  为空间频率,  $d$  为探测器像元尺寸,  $f_N$  为奈奎斯特频率,  $M$  为 TDI 累加级数。

从(16)式可以看出,  $M$  与速度失配共同决定系统 MTF 退化值。如果要求在奈奎斯特频率处速度失配导致 MTF 退化后的系统 MTF 不超过 0.64, 即  $f_{MT\_err} > 0.64 @ f = f_N$ , 则要求  $M(V_p - V_f) / V_p < 1$ , 因此, 在 TDI 成像系统中  $M$  的选择必须考虑速度失配因素。

## 4 实验与结果分析

完成系统设计与实验设备调试后, 可以进行外场微光成像实验。数字域 TDI 外景成像示意图如图 5 所示。实验参数如表 3 所示, 探测器积分时间设定为 1 ms, 等效在 700 km 轨道高度, 系统空间分辨率可达 6.9 m。

根据转台速度精度和成像系统帧频精度可以得出速度失配因子为  $(V_p - V_f) / V_p = 5.06\%$ , 在满足 MTF 不低于 0.64 的条件下, 即  $M(V_p - V_f) / V_p < 1$ , 需要  $M < 20$ , 因此, 共获取 3 种积分级数的成像数据 (对应 TDI 阶数为 1、10 和 30), 结果如图 6 所示。

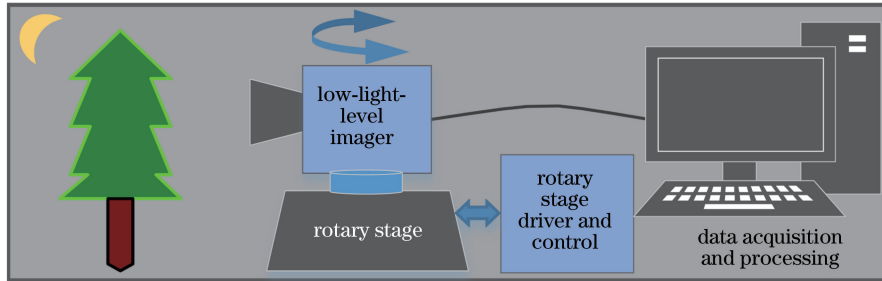


图 5 数字域 TDI 外景成像示意图

Fig. 5 Schematic of digital domain TDI field imaging

表 3 微光成像实验参数

Table 3 Parameters of low-light-level imaging

Parameter	Value
Frame rate / (frame · s <sup>-1</sup> )	58.97 (interface limited)
Frame period error / ms	0.01
Integration time / ms	0.98
$f$ / mm	12.7
Rotary velocity / [(°) · s <sup>-1</sup> ]	1.73 (match frame rate)
Rotary accuracy / %	5
Illuminance / lx	1-3 (estimated)

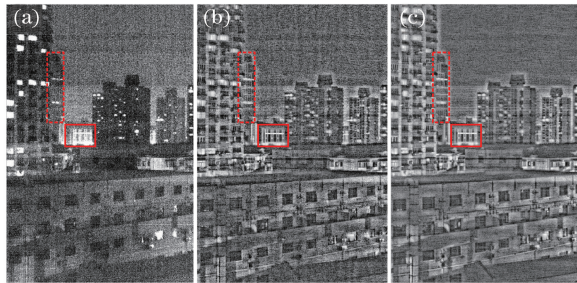


图 6 不同级数下的数字域 TDI 外景成像图 (积分时间 1 ms)。 (a)  $M=1$ ; (b)  $M=10$ ; (c)  $M=30$

Fig. 6 Field images of digital domain TDI with different stages (integration time of 1 ms).

(a)  $M=1$ ; (b)  $M=10$ ; (c)  $M=30$

从图 6 可知, 随着积分级数的增加, 图像整体噪点大幅减少, 对比度逐渐增强。对比虚线框中的建筑物图像可知, 3 幅图像的信噪比逐渐提高, 实线框中建筑物图像的动态范围也进一步提高, 说明数字域 TDI 成像模式可以显著提升微光图像质量。另外, 由于级数为 30 时, 速度失配导致的 MTF 下降过多, MTF 值已经低于 0.64, 所以从实线框中建筑物轮廓的清晰程度可以看出, 虽然 30 级的信噪比优于 10 级, 但其图像锐度不如 10 级。在轨成像过程中, 平台可采用像移补偿的方式提高速度精度, 当忽略平台精度影响, 仅考虑探测器帧频失配误差导致 MTF 下降但 MTF 值仍高于 0.64 时, 理论上可实现最大累加级数为 1666, 实际上帧频误差也可以通过时序调整进一步降低, 因此, 累加级数可同时满足信噪比及 MTF 需求。

为量化说明 TDI 模式对信噪比的提升, 选择 3 幅图像右上角均匀非饱和区域数据, 分别计算图像信号 DN 值、均方根噪声 DN 值和图像信噪比, 结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 采用数字域 TDI 成像模式后图像信噪比提高, 积分级数由 1 增加到 30 时, 系统成像

表 4 不同级数数字域 TDI 图像参数(积分时间 1 ms)  
Table 4 Image parameters of different digital domain TDI stages (integration time of 1 ms)

Parameter	Stage number		
	1	10	30
Signal DN	16.3	162.9	491.1
Noise DN	9.12	29.67	50.39
SNR /dB	5.04	14.79	19.78

信噪比由 5.04 dB 提高到 19.78 dB,与理论计算值

表 5 不同累加级数系统动态范围测量结果

Table 5 Measured results of dynamic range with different stages

Parameter	Stage number					
	1		10		30	
	Traditional method	Proposed method	Traditional method	Proposed method	Traditional method	Proposed method
Maximum DN	65535	65535	65535	65535	65535	65535
Noise DN	7.47	7.47	24.25	2.42	46.51	1.55
$R_{DR}/dB$	78.86	78.86	68.64	88.65	62.98	92.52
$\Delta R_{DR}/dB$		0		20.01		29.54
Theoretical $\Delta R_{DR}/dB$		0		20		29.542

从表 5 中的实测结果可以看出,所提出的动态范围扩展方法使得系统动态范围随累加级数增加而增大,而传统数字域 TDI 方法刚好相反,且在两种累加级数下,实测动态范围变化值与理论值相符,充分说明本文方法可以有效提升系统动态范围。

## 5 结 论

提出了一种基于全局快门 sCMOS 图像传感器的数字域 TDI 微光成像方法,分析了数字域 TDI 成像模式对 sCMOS 图像传感器的需求,推导了可应用于工程中的数字域 TDI 图像处理方法。提出的系统动态范围扩展方法可以有效提升微光成像系统动态范围,对系统 MTF 的分析为数字域 TDI 积分级数的选取提供了依据。

实验结果表明,数字域 TDI 成像方法能够显著提高微光图像质量,图像的 SNR 由未积分的 5.04 dB 提高到积分级数为 30 时的 19.78 dB,系统动态范围比传统方法提升了 29.54 dB。因此,基于全局快门 sCMOS 图像传感器的数字域 TDI 微光成像技术能够满足高分辨率及大动态范围空间微光成像的需求,该技术的研究为设计与实现空间微光成像系统提供了新思路。

## 参 考 文 献

[1] Elvidge C D, Baugh K E, Zhizhin M, *et al.* Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping

误差较小,再次验证了数字域 TDI 信噪比模型的可靠性和数字域 TDI 成像方法的可行性。

为了对本文方法进行定量化验证,选取未累加图像中 DN 值低于  $2^{16}/M$  的局部区域计算噪声值代替系统读出噪声,同时将另外两幅图像相应区域的噪声作为 TDI 后读出噪声值,并选取场景最大 DN 值代替系统饱和值,计算 3 种 TDI 累加级数对应的系统动态范围,计算结果如表 5 所示。

nighttime lights[J]. Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 2013, 35: 62-69.

[2] Boulenc P, Robbelein J, Wu L, *et al.* High speed TDI embedded CCD in CMOS sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10562: 105622P.

[3] Qu H S, Zhang Y, Jin G. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain[J]. Optics & Precision Engineering, 2010, 18(8): 1896-1903.

曲宏松,张叶,金光. 基于数字域 TDI 算法改进面阵 CMOS 图像传感器功能[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1896-1903.

[4] Mayer F, Bugnet H, Pesenti S, *et al.* First measurements of true charge transfer TDI (time delay integration) using a standard CMOS technology [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10564: 105640N.

[5] Xu J T, Shi X L, Nie K M, *et al.* A global shutter high speed TDI CMOS image sensor with pipelined charge transfer pixel [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(7): 2729-2736.

[6] Yu H, Qian X Y, Guo M H, *et al.* An antivibration time-delay integration CMOS image sensor with online deblurring algorithm [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2016, 26(8): 1544-1554.

[7] 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.

[8] Tao S P, Jin G, Qu H S, *et al.* Design and analysis

- of CMOS camera based on time delay and integration in digital domain to realize spatial high-resolution imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0411001.
- 陶淑苹, 金光, 曲宏松, 等. 实现空间高分辨成像的数字域时间延迟积分 CMOS 相机设计及分析 [J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0411001.
- [9] Tao S P, Jin G, Qu H S, *et al.* Design of CMOS imaging system based on rolling TDI in digital domain [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2380-2385.
- 陶淑苹, 金光, 曲宏松, 等. 采用卷帘数字域 TDI 技术的 CMOS 成像系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2380-2385.
- [10] Xu C, Yao S Y, Xu J T, *et al.* A dynamic range extension scheme applied to a TDI CMOS image sensor [J]. *Journal of Semiconductors*, 2014, 35(2): 024013.
- [11] Lan T J, Xue X C, Li J L, *et al.* A high-dynamic-range optical remote sensing imaging method for digital TDI CMOS [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(10): 1089.
- [12] Lang J W, Wang Y M, Wang J Y. Applications of high sensitivity APS CMOS sensors for imaging spectrometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0711003.
- 郎均慰, 王跃明, 王建宇. 高灵敏度 APS CMOS 图像传感器光谱探测技术研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0711003.
- [13] Zhang L S, Liu Z J, Ma W P, *et al.* Infrared imaging technology based on pixel-level digital integration [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 091102.
- 张丽莎, 刘兆军, 马文坡, 等. 像素级数字积分红外成像技术研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 091102.
- [14] Guo L L, Wu Z P, Zhao Q C, *et al.* On-orbit modulation transfer function measurement of medium resolution spectral imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0428002.
- 郭玲玲, 吴泽鹏, 赵其昌, 等. 中分辨率光谱成像仪在轨调制传递函数测量方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0428002.
- [15] Lin L, Yao S Y, Xu J T, *et al.* Research on modulation transfer function model of TDI-CMOS image sensor with oversample-superposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0228002.
- 李林, 姚素英, 徐江涛, 等. TDI-CMOS 图像传感器多次采样叠加调制传输函数模型研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0228002.