

文章编号: 1672-8785(2016)07-0016-07

基于数字 TDI 技术的紫外成像系统的设计

董龙平^{1,2,3} 房陈岩^{1,2,3} 黄小仙^{1,2} 尹达一^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了实现高灵敏度紫外探测, 基于 600×500 元紫外电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 图像传感器, 创新性地运用软件开窗技术设计了一种基于数字时间延迟积分 (Time Delay Integration, TDI) 的紫外成像系统。具体分析了成像系统的噪声来源以及 TDI 阶数 M 对成像系统信噪比的影响, 并从理论上分析了采用 M 阶数字 TDI 技术对成像系统信噪比的影响。然后详细介绍了在 FPGA 内部实现数字 TDI 算法的情况, 并给出了数据采集系统中的上位机交互流程。实验结果表明, 基于数字 TDI 技术的紫外成像系统可以获得较高的图像对比度和信噪比以及优良的成像质量。

关键词: 紫外成像系统; 数字 TDI; 信噪比; 软件开窗

中图分类号: TN23 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.07.003

Design of UV Imaging System Based on Digital TDI Technology

DONG Long-ping^{1,2,3}, FANG Chen-yan^{1,2,3}, HUANG Xiao-xian^{1,2}, YIN Da-yi^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To realize high sensitivity ultraviolet (UV) detection, a UV imaging system based on digital Time Delay Integration (TDI) is designed innovatively by using a software windowing technology on the basis of a 600×500 UV Charge Coupled Device (CCD) image sensor. The noise sources of the imaging system and the influence of M -stage digital TDI on the Signal-to-Noise Ratio (SNR) of the imaging system are analyzed in detail. The influence of M -stage digital TDI technology on the SNR of the imaging system is analyzed in theory. Then, the implementation of digital TDI algorithm within FPGA is presented in detail and the interaction process of the data collection system in PC is given. The experimental results show that the UV imaging system based on digital TDI technology can obtain higher image contrast, better SNR and excellent imaging quality.

Key words: UV imaging system; digital TDI; SNR; software windowing

收稿日期: 2016-04-07

作者简介: 董龙平(1989-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要研究方向为空间光电遥感技术。

E-mail: dl_sitp@163.com

0 引言

随着遥感技术的飞速发展,光电探测领域已经从可见光波段拓展到红外和紫外波段。其中,紫外探测技术也已经从最初的保密性军事应用逐渐延伸到诸如刑侦检测、科学探索、农业生产环境检测等民用领域^[1-4]。由于紫外探测应用领域的不断拓宽,高灵敏度紫外探测具有极其重要的意义^[5]。TDI 技术可以有效增加图像传感器的等效积分时间,进而提高探测系统的灵敏度。目前,航空航天用高分辨率探测系统已普遍采用 TDI-CCD 图像传感器^[6]。然而 TDI-CCD 的只能动态推扫图像、积分阶数不可调整以及调偏流机构复杂等缺陷则制约了它的广泛应用^[7]。

因此,本文创新性地提出了一种基于面阵 CCD 传感器以及软件开窗技术的用于对模数转换后的信号进行时间延迟积分的方法。通过这种新型 TDI 成像模式可以实现高灵敏度紫外探测。由于 TDI 算法过程发生在数字域,我们将其称为数字 TDI 成像技术^[8]。

1 数字 TDI 技术分析

1.1 概述

模拟 TDI 的功能是,在成像系统的推扫成像过程中,光生电荷在传感器内部累加后一次性读出。这是个电荷模拟叠加的过程,因此称之

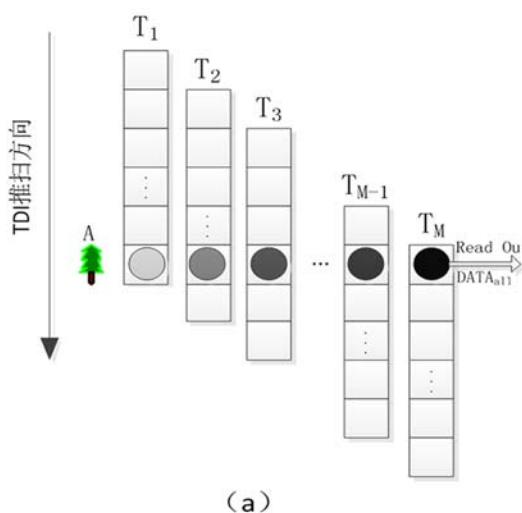


图 1 (a) 模拟 TDI 的工作原理; (b) 数字 TDI 的工作原理

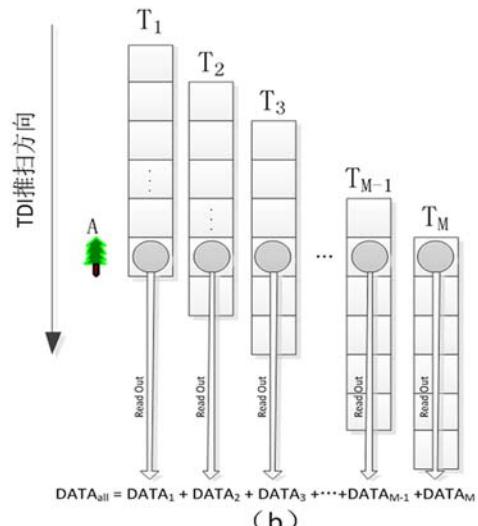
为模拟 TDI。图 1(a) 为 M 阶模拟 TDI 成像的示意图。其中,小球表示不同行像元对同一景物 A 进行曝光。每次曝光后,像元电荷转移到下一个像元;与下一个积分周期产生的电荷累加,直到 M 次累加后将电荷一次性读出(即图 1(a) 中的 $DATA_{all}$)。至此也就完成了整个 M 阶模拟 TDI 成像过程。

图 1(b) 所示为数字 TDI 成像过程。图像传感器对景物 A 曝光后立即将其光生电荷读出。通过模数转换将其转换成数字量,然后对数字量进行 M 阶累加,即图 1(b) 中 $DATA_{all} = DATA_1 + DATA_2 + DATA_3 + \dots + DATA_{M-1} + DATA_M$, 至此完成数字 TDI 累加过程。

模拟 TDI 和数字 TDI 都是在成像系统的推扫成像过程中对同一景物进行多次曝光,并采用延长等效积分时间的方法来实现高灵敏度探测的。其中,模拟 TDI 在图像传感器内部电荷转移时完成累加,而数字 TDI 则在图像传感器外部完成电压数字量化之后再累加,因此两者之间有着本质区别。由于模拟 TDI 的电荷是在传感器内部的电荷阱中累加的,所以对 CCD 的电荷阱深有一定要求,进而对模拟 TDI 的阶数有所制约。而数字 TDI 则无需考虑电荷阱深,这也就提高了数字 TDI 的灵活性。

1.2 M 阶数字 TDI 系统的性噪比

紫外成像系统的噪声主要包括入射光的光



子散粒噪声 N_{sh_d} 、传感器的内部噪声 N_{dec_d} 、传感器的读出噪声 N_{rd_d} 以及后端信息获取电路的噪声 N_{prc_d} 。这些噪声都是随机且相互独立的。根据不相关性原理，紫外成像系统的总噪声 N_{total} 可以表示为

$$N_{total} = \sqrt{N_{sh_d}^2 + N_{dec_d}^2 + N_{rd_d}^2 + N_{prc_d}^2} \quad (1)$$

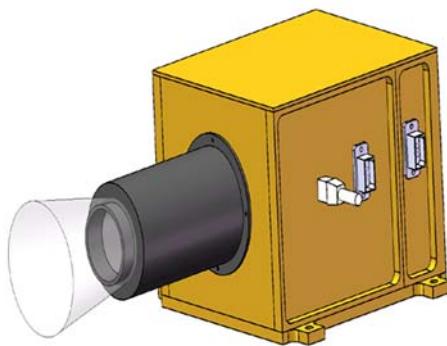
在实现 M 阶数字 TDI 累加的过程中，信号电压和噪声同时进行了 M 次累加。因此， M 阶数字 TDI 累加后的噪声为

$$\begin{aligned} N_{TDI_M} &= \left(M \times N_{sh_d}^2 + M \times N_{dec_d}^2 \right. \\ &\quad \left. + M \times N_{rd_d}^2 + M \times N_{prc_d}^2 \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

M 阶数字 TDI 累加后的信号为 $S_{signal_TDI} = M \times S_{signal}$ 。其中， S_{signal} 为单个像元一次曝光时的信号。因此，紫外成像系统的信噪比为

$$\begin{aligned} SNR_{TDI_M} &= \frac{S_{signal_TDI}}{N_{TDI_M}} \\ &= \frac{\sqrt{M} \times S_{signal}}{\sqrt{N_{sh_d}^2 + N_{dec_d}^2 + N_{rd_d}^2 + N_{prc_d}^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

由上述各式可知，基于 M 阶数字 TDI 的紫外成像系统的信噪比与 \sqrt{M} 成正比。与单线列推扫成像系统相比，基于 M 阶数字 TDI 的成像系统的信噪比提高了 \sqrt{M} 倍。从理论上来说，在推扫成像时， M 越大，成像系统的信噪比越大，获得的图像质量也越高。但另一方面，在 M 阶数字 TDI 累加后，图像的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 退化远大于普通线阵。其原因主要包括卫星扫描时的同步匹配以及由地球自转引起的偏流角两个方面^[9-10]。



2 基于数字 TDI 的紫外成像系统

2.1 面阵 CCD 图像传感器及系统结构

基于数字 TDI 的紫外成像系统采用 600×500 元面阵紫外帧转移型 CCD 图像传感器。其中，单个像元的大小为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ ，图像传感器像元的最大读出速率为 14 MHz ，紫外波段的量子效率可达 40% 以上。

通过整合紫外光学组件、图像传感器和机械结构，我们搭建了一种基于数字 TDI 的紫外成像系统。图 2 为该系统的结构示意图和实物图。

2.2 成像电子学系统

图 3 为基于数字 TDI 的紫外成像系统的电子学示意图。模拟驱动板和 FPGA 分别用于产生图像传感器的偏置电压和驱动时序。目标物图像经过紫外滤光片被汇聚到图像传感器的焦面上；由于受到光照变化的影响，图像传感器产生光生电荷包；通过读出电路生成并输出模拟电压信号；该信号经模拟调理电路 (模拟信号放大、滤波) 后进入模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC)，随后得到的数字信号经串行 LVDS 传输给 FPGA 芯片。根据上位机的传输指令，按照要求采用 TDI 算法对得到的数字图像信号进行处理。最后，通过千兆以太网将处理后的数据传送到上位机，并在上位机上完成实时显示和存储功能。

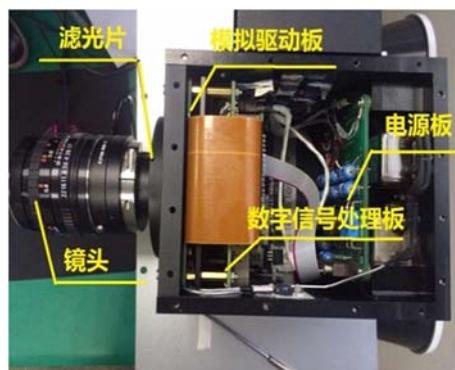


图 2 基于数字 TDI 的紫外成像系统的结构示意图和实物图

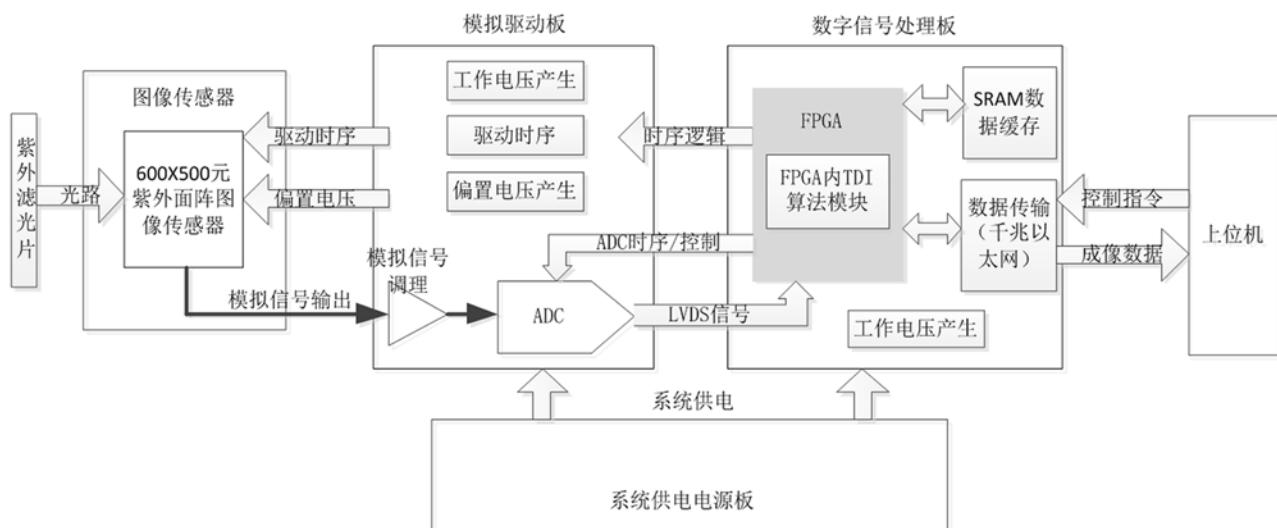


图 3 基于数字 TDI 的紫外成像系统的电子学示意图

2.3 数字 TDI 算法的 FPGA 实现

本文选用美国 ALTERA 公司生产的 EP2S-60F484C4 型 FPGA。它含有 60440 个等效逻辑单元, 内部 RAM 容量高达 2.5 Mbit; 具有 12 个 PLL 和 334 个可配置 IO 引脚, 并有足够的资源可用于进行图像处理。

FPGA 内的 TDI 算法模块是通过用 Verilog 软件编写硬件描述语言来实现的(具体的实现过程见图 4)。该算法的主要流程可以概括如下: 在一个滚筒式 RAM 存储器中, 当接收到一帧数字 TDI 图像数据后, 将数据帧中的第一行数据(600 元)与相应地址 RAM 中的原有数据相加后读出, 作为 TDI 累加后得到的数据; 将数据帧中的最后一行数据直接写入相应地址 RAM 中; 将数据帧中的其他数据加上相应地址 RAM 中的数据, 并将其和重新写入 RAM。滚筒式 RAM 头尾相连。当 RAM 地址到达其尾部时, 将其地址置为零。通过千兆以太网将输出数据传送到上位机上进行显示。

2.4 系统上位机的软件实现

用户与基于数字 TDI 的紫外成像系统之间通过上位机程序进行交互。PC 机与成像系统之间通过千兆以太网相连。图 5 为上位机的流程图。本文设计中的上位机功能如下: 通过千兆以太网向硬件系统发送控制指令和配置指令, 并设置基于数字 TDI 的紫外成像系统的运行状态,

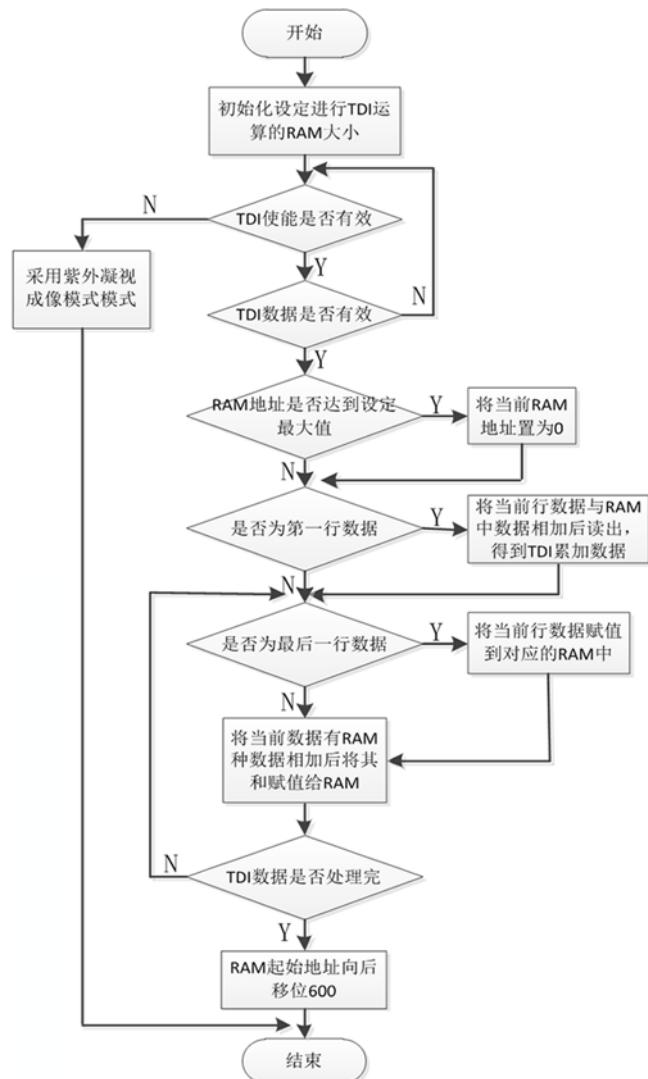


图 4 数字 TDI 算法的 FPGA 实现过程

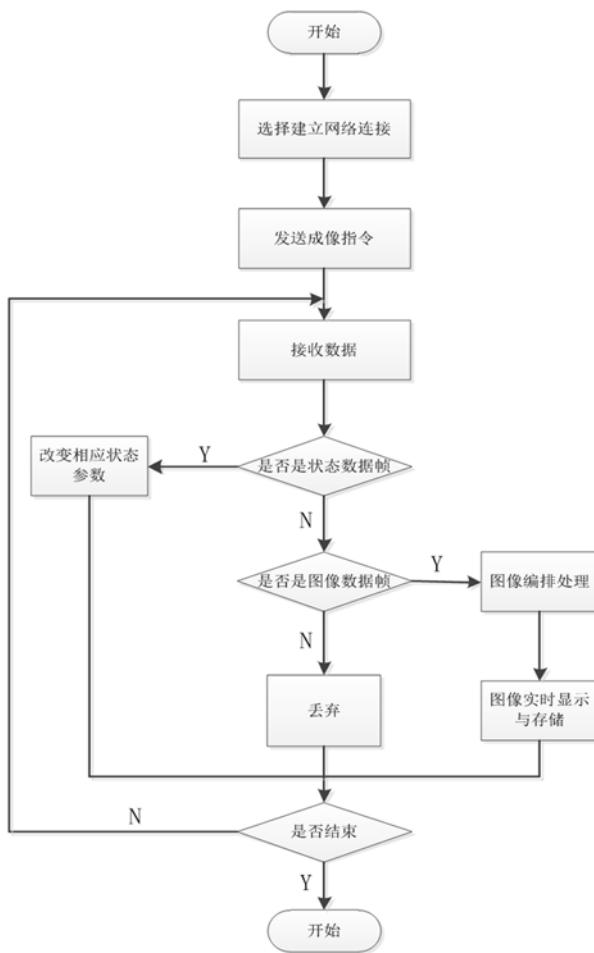


图 5 成像系统上位机的流程图



图 6 上位机的 GUI 界面

工作模式和工作参数等；接收成像系统上传的数字图像帧和系统运行状态帧，用于图像实时显示和系统运行状态判定；实现诸如背景减除、图像局部放大、实时码值显示之类的附加功能，以更方便地判定图像质量。图 6 为上位机正在成像时的 GUI 界面。

3 成像测试结果

在室温条件下，图像传感器工作在 6.6 MHz 时钟下，并配合转台控制器进行外景成像实验。由于采用 CCD 图像传感器软件开窗形式来实现基于数字 TDI 的紫外成像技术，成像系统除了可以实现数字 TDI 推扫成像之外，还可以实现凝视成像。图 7 所示为基于数字 TDI 的紫外成像系统的外景成像实验平台。

3.1 成像系统的噪声测试

按照图 7 搭建基于数字 TDI 的紫外成像系统，并盖上镜头盖以防止光辐射进入成像系统。系统上电后对其进行测试，并通过相关处理从采集到的数据中得到成像系统的噪声。图 8(a) 所示为紫外成像系统在凝视成像时各个像元的噪声 (DN 值)；图 8(b) 所示为基于 M 阶数字 TDI

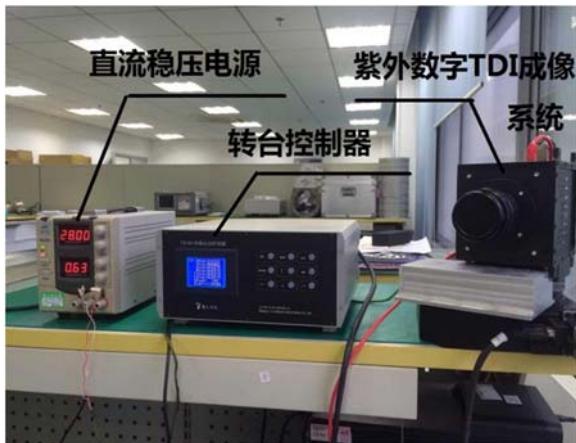


图 7 外景成像实验平台

表 1 噪声均值与 TDI 阶数 M 之间的关系

TDI 阶数 M	噪声均值 (LSB)	等效噪声电压 (mV)
1	5.46	0.67
2	4.06	0.50
4	2.86	0.35
8	2.29	0.28
16	1.61	0.20
32	1.40	0.17
64	0.81	0.10

的紫外成像系统的噪声码值 (DN 值)。

图 8(a) 中, 面阵图像传感器各像元的噪声均值为 5.4 LSB。由于系统设计所采用的 ADC 量化等级为 14 位, 满量程电压为 2 V, 所以该系统的等效噪声电压值为 0.66 mV。表 1 列出了

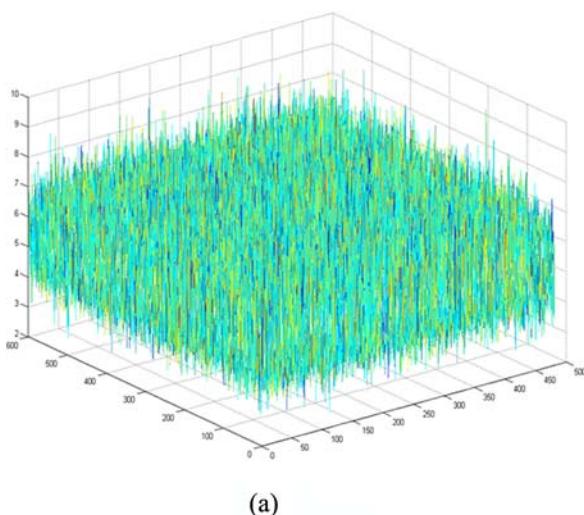
图 8(b) 中数字 TDI 紫外成像系统的噪声均值与 TDI 阶数 M 之间的关系。

3.2 外景推扫成像实验及结果

为了验证基于数字 TDI 的紫外成像系统对微弱光线也具有较强的成像效果这一点, 我们在多云天气且光线较弱的情况下开展了成像实验。将成像系统中的图像传感器的积分时间设为 10 ms, 并采用 1 阶、4 阶、8 阶和 16 阶四种 TDI 阶数进行成像(结果见图 9)。从成像效果上来看, 随着数字 TDI 阶数 M 的不断增大, 图像变得愈加清晰, 局部细节也更加明显。与 1 阶 TDI 图像相比, 16 阶数字 TDI 图像具有明显改善。这是因为数字 TDI 成像技术延长了图像传感器的等效积分时间, 使得采用 16 阶 TDI 时图像传感器的积分时间比采用 1 阶 TDI 时增加了 16 倍。因此, 数字 TDI 成像技术能够有效提高紫外成像系统的灵敏度。

4 结束语

本文利用 600×500 元帧转移型紫外 CCD 图像传感器设计了一种图像采集处理系统。该系统采用软件开窗方法实现了数字 TDI 功能, 并以此验证了用数字 TDI 技术有效提高成像系统信噪比的可行性。本文从理论上分析了成像系统的信噪比与 TDI 阶数 M 之间的关系, 并详细



(a)

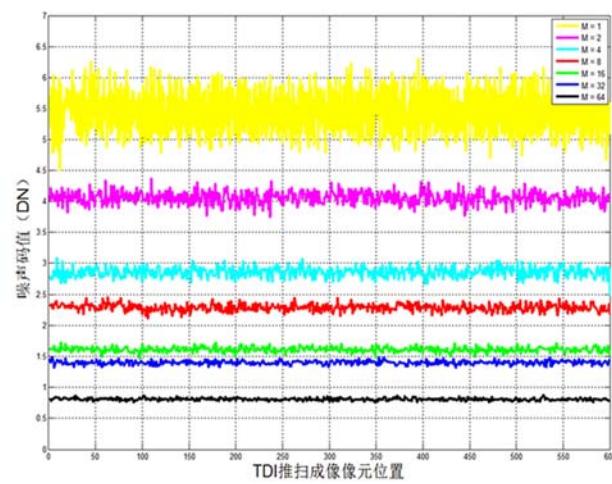


图 8 紫外成像系统的噪声: (a) 凝视成像模式; (b) 数字 TDI 成像模式

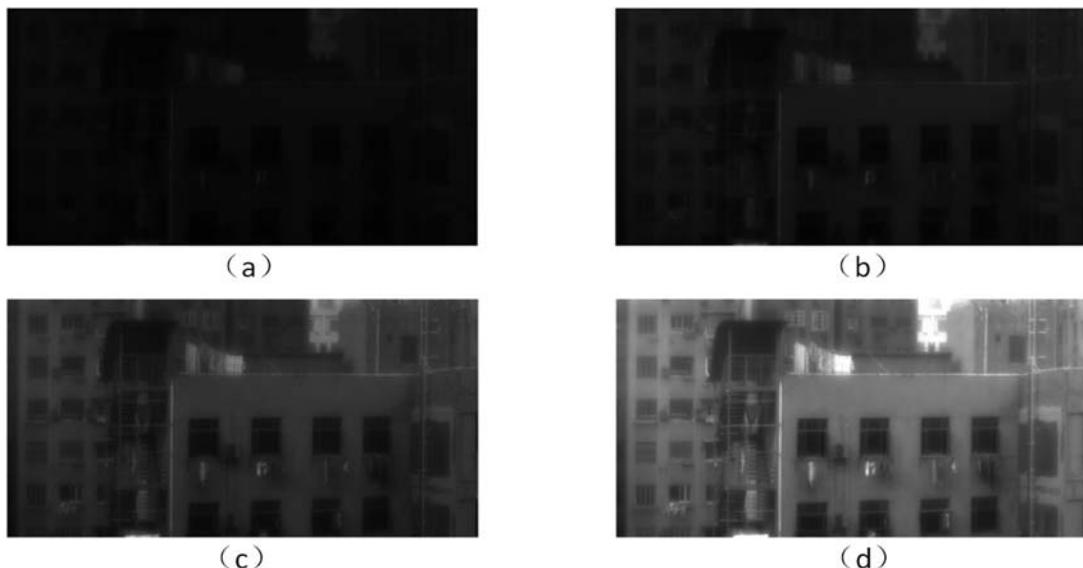


图 9 基于数字 TDI 的紫外成像系统的外景成像实验: (a) $M=1$; (b) $M=4$; (c) $M=8$; (d) $M=16$

介绍了系统组成情况。实验结果表明,与采用 1 阶 TDI 时相比,该系统在采用 16 阶 TDI 时的成像质量具有很大提升,且图像的局部细节得到了很好的呈现,为后续的高灵敏度紫外探测构建了一个良好的平台。

参考文献

- [1] 斯贵平, 庞其昌. 紫外指纹检测仪的研制 [J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 198–202.
- [2] 万同山. 空间紫外天文探测者 [J]. 天文学进展, 1999, 17(3): 207–216.
- [3] Gavin King, James Walsh, Suzanne Martin. Spectroscopic Study of Food and Food Toxins [C]. Avingnon: OPTO Ireland International Society for Optics and Photonics, 2003.
- [4] 张永宁, 丁倩, 高超, 等. 油膜波谱特征分析与遥感监测溢油 [J]. 海洋环境科学, 2000, 19(3): 5–10.
- [5] 刘榴娣, 倪国强, 钟生东, 等. 紫外线的应用、探测及其新发展 [J]. 光学技术, 1998, 3(2): 87–90.
- [6] 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.
- [7] 陶淑萍. 数字域 TDI CMOS 相机调偏流方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 214–218.
- [8] 陶淑萍, 金光, 曲宏松, 等. 实现空间高分辨成像的数字时间延迟积分 CMOS 相机设计与分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0411001.
- [9] 张毅, 李英才, 王虎. 航天 TDI-CCD 亚像元相机的 MTF 研究 [J]. 光子学报, 2005, 34(10): 1590–1592.
- [10] 杨秀彬, 贺小军, 张刘, 等. 偏流角误差对 TDI CCD 相机成像的影响与仿真 [J]. 光电工程, 2008, 35(11): 45–50.

新闻动态 News

日本 Photron 公司推出 32GB 军用高速摄像系统

据 www.militaryaerospace.com 网站报道, 2016 年 7 月 8 日 Photron 公司在圣地亚哥为 FASTCAM Mini AX, FASTCAM Mini UX 和 FASTCAM Mini WX 高速摄像系统推出了满足高帧速率成像应用需求的 32GB 内存机型。

32GB 是 16GB 内存的 2 倍。其他内存选项如 4GB、8GB 和 16GB 在军事和航空航天研究

应用、机载和场外的汽车安全检测、生物力学、材料科学、流体力学和关键实验室研究时仍然可以使用。

Mini AX 系列提供 ISO 40000(单色)和 ISO 16000(彩色)。为适应行业真正的 ISO 12232 SSAT 标准, 红外滤镜不会移除以免产生虚构的 T 值。

相机系统具有高性能千兆以太网接口, 在 100 G、10 ms 和 6 轴条件下的测试表明, 相机能在高字节、高冲击的环境下使用。

□ 张小华