

〈系统与设计〉

## 基于数字 TDI 技术的红外成像系统设计

谢宝蓉, 冯书谊, 方彩婷, 张 宁

(上海电子技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 为提高红外遥感系统的探测灵敏度, 以  $320 \times 256$  CMOS 红外图像传感器为图像采集芯片, 创新地设计了基于数字 TDI 技术的图像采集、传输和显示系统。从理论上详细地分析了数字 TDI 技术对于系统信噪比的影响, 并给出了基于 FPGA 的数字 TDI 的逻辑设计实现。实验结果表明, 基于数字 TDI 技术的图像系统取得了优良的信噪比特性和很好的图像质量。

**关键词:** 数字 TDI; 红外成像系统; CMOS 传感器; 信噪比

**中图分类号:** TN216

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-8891(2013)04-0207-04

## Infrared Imaging System Design Based on Digital TDI Technology

XIE Bao-rong, FENG Shu-yi, FANG Cai-ting, ZHANG Nin

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** To improve the sensitivity of the infrared remote sensing system, an innovative design about acquisition, transmission and display imaging system is described based on  $320 \times 256$  CMOS infrared sensor as imaging acquisition chip. This paper presents a detailed analysis about the influence of the digital TDI to system SNR and a logical design of digital TDI implemented based on FPGA. The experiment result demonstrates the imaging system grounded on digital TDI technology achieves an excellent SNR characteristic and a good image quality.

**Key words:** digital TDI, infrared imaging system, CMOS sensor, SNR

### 0 引言

红外遥感成像技术作为当今迅速发展的高新技术之一, 越来越广泛地应用于气候预测、自然灾害检测、地球环境检测、导航、农业、天文学等领域。无论是在民用领域还是天文学研究, 研究高灵敏度的红外探测成像技术都有着积极的意义<sup>[1]</sup>。时间延迟积分技术(TDI)是一种有效拓展传感器积分时间从而提高探测系统灵敏度的方法, 而常规的红外 TDI 焦平面器件本身的电荷容量较小, 背景辐射较大, 容易形成饱和, 因而积分时间很短, 所以相对于红外遥感推扫成像时较长的驻留时间来说, 也不能实现长时间的积分, 从而系统的灵敏度难以满足要求。因此, 若要利用相对较长的驻留时间, 实现高灵敏度的红外遥感成像, 需要研究和电荷容量较小的红外焦平面器件相适应的工作模式来实现积分

时间的拓展。

因此, 本文创新性地提出了一种利用面阵传感器实现数字 TDI 功能从而提高红外探测系统灵敏度的方法, 并建立了一套成像系统进行验证。

### 1 数字 TDI 技术

#### 1.1 概述

传统的 TDI 功能是电荷在传感器内部进行累加的过程, 通常采取 CCD 模拟电路实现, 因此称之为模拟 TDI 技术。如图 1 所示, 模拟 TDI 传感器进行时间延迟积分时, 串行扫过同一景物形成的电荷是在传感器内部进行累加, 然后经由读出电路读出后, 在后端信息处理电路中进行差分放大和数字量化。

而对于数字 TDI 系统, 如图 2 所示, 传感器输出的信号先进行数字化, 光电电荷不是以电荷形式

的直接相加,而是经过差分放大、数字量化后变为电压后以数字化的形式进行累加。

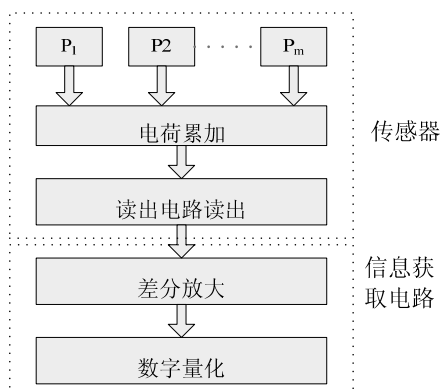


图1 模拟 TDI 工作原理

Fig.1 Analog TDI working principle

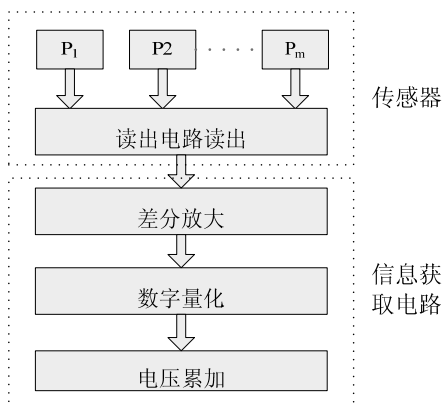


图2 数字 TDI 工作原理

Fig.2 Digital TDI working principle

模拟 TDI 和数字 TDI 都是通过多个串扫过同一景物的像元进行积分或累加的工作方式提高系统灵敏度,但模拟 TDI 技术实现的传感器内部电荷的累加,数字 TDI 实现的是电压量化后的累加,这是两者根本的不同。通过上述分析可知,数字 TDI 技术由于电压累加是在传感器外部进行,而不是在传感器内部进行电荷累加,因此相对于模拟 TDI 技术来说,受限于红外焦平面电荷容量小的影响较小,可以根据需要调整像元的累加次数,这相对于模拟 TDI 技术提高了应用的灵活性。

### 1.2 数字 TDI 技术对系统信噪比的影响分析

红外成像系统中的噪声分为背景光子噪声、传感器内部噪声、信息获取电路噪声。其中背景光子噪声和信息获取电路噪声统称为传感器外部噪声。噪声大多是随机变量随时间变化的过程,瞬时值不能确定,不能用解析函数描述,只能用概率和统计的方法进行描述,如方差、均方根、噪声谱密度等。假设背景光子噪声、传感器内部噪声、信息获取电路的噪声是相互独立的随机过程,都具有不相关

性,那么总的均方噪声为各个噪声源的均方噪声之和<sup>[2-3]</sup>。

对于数字 TDI 系统,假设背景光子噪声为  $N_{ph\_d}$ ,每一级 TDI 像元引入的传感器内部噪声为  $N_{det\_d}$ ,信息获取电路噪声为  $N_{pre\_d}$ ,在实现数字 TDI 功能时,背景光子噪声、传感器内部噪声和信息获取电路噪声分别进行  $M$  次的累加。

那么  $M$  阶数字 TDI 系统噪声电压值为:

$$N_{total\_d} = \sqrt{M \times N_{ph\_d}^2 + M \times N_{det\_d}^2 + M \times N_{pre\_d}^2} \quad (1)$$

$M$  阶数字 TDI 系统信噪比为:

$$SNR_{M\_d} = \frac{\sqrt{M} S_{0\_d}}{\sqrt{N_{ph\_d}^2 + N_{det\_d}^2 + N_{pre\_d}^2}} \quad (2)$$

式中:  $\overline{S_{0\_d}}$  为各像元电压和的平均值。

$$SNR_{1\_d} = \frac{\overline{S_{0\_d}}}{\sqrt{N_{ph\_d}^2 + N_{det\_d}^2 + N_{pre\_d}^2}} \quad (3)$$

由上述各式得出,在  $M$  阶的数字 TDI 系统中,系统的信噪比与  $M^{1/2}$  成正比。通过前述数字 TDI 系统与模拟 TDI 系统的工作原理可知,数字 TDI 系统相对于传统的模拟 TDI 技术引入了  $M$  次的信息获取电路噪声即电路中的放大电路噪声和 A/D 量化噪声的累加,因此在设计时应当尽量使放大电路噪声和 A/D 量化噪声相对传感器内部噪声足够小<sup>[4]</sup>。

## 2 数字 TDI 验证系统

### 2.1 320×256 图像传感器

320×256 CMOS 红外图像传感器为 320 行,256 列的面阵传感器,采用制冷工作方式,单个像元大小为  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 。传感器可选择 4 通道并行输出,像素输出率时钟最高为 6.6 MHz,动态范围可达 80 dB 以上。

### 2.2 图像采集系统

如图 3 所示,目标图像经过光学系统汇聚成像在传感器的焦平面上。驱动电路模块产生图像模拟信号,模拟信号在驱动电路模块进行滤波、差分放大后输出到控制模块中,由 A/D 采样量化并由 FPGA 读出后变为串行 LVDS 数据送给处理模块。处理模块接收到图像数据,对接收到的图像数据串并转换,并经由 PCI 采集卡定时将图像发送到 PC 机中进行存储、处理和显示图像。

### 2.3 数字 TDI 功能逻辑实现

设计中 FPGA 芯片采用的是 ALTERA 公司的

Cyclone3 EP3C25Q240CBNES, 此芯片是 2007 年新上市的芯片, 约有 24 624 个逻辑单元, 内含 594 kb, 66 个 Multipliers, 4 个 PLL, 有 148 个 I/O 引脚, 较适合于图像处理。

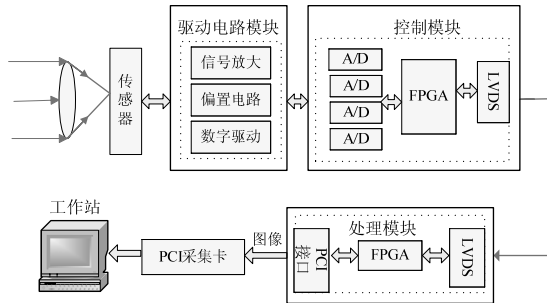


图 3 图像采集系统示意图

Fig.3 Imaging acquisition system

FPGA 的逻辑设计使用 VHDL 硬件描述语言自顶而下的思想进行设计。FPGA 内部数字 TDI 算法实现流程图如图 4 所示。程序中, 若传感器数字 TDI 阶数为  $M$ , 则读出  $M$  列像元, 在程序中定义 3 个缓冲用于实现数字 TDI 累加, 即 Now\_buf、Res\_buf 和 Out\_buf。其中, Now\_buf 用于存储当前读取的帧数据, Res\_buf 用于存储对应像元的中间累加结果, Out\_buf 为最终的数字 TDI 累加结果。实现过程如下: 当一帧 ( $M$  列, 320 行) 数据到来时, 读取当前帧数据并存入 Now\_buf 中, 读出 Res\_buf 缓冲中的数据, 并将当前帧的数据与 Res\_buf 缓冲中的对应相同空间位置数据进行累加, 如果是第一列数据, 则存入 Out\_buf 中, 否则存回到 Res\_buf 中, 当完成  $M$  次数字累加后, 读取累加后的第一列图像数据除以  $M$  进行归一化后发送给 PCI 采集卡。由于刚开始的  $M-1$  帧图像数据没有进行  $M$  次的累加, 视为无效帧予以丢弃。

3 测试结果

3.1 成像系统信噪比测试

由于此传感器属于长波红外波段, 因此探测系统的信噪比用 NETD 来表示。NETD 的定义如下: 温度为  $T_1$  的均匀方形黑体目标处在温度为  $T_B$  ( $T_1 > T_B$ ) 的均匀黑体背景中构成测试图案, 其中黑体目标的尺寸要求超过系统瞬时视场的若干倍, 热像仪对这个测试图案进行观测, 当系统输出的信号电压峰值和噪声电压的均方根值之比为 1 时, 黑体目标和黑体背景的温差称为噪声等效温差 (NETD)。实际测量时使用黑体辐射目标, 系统对温度分别为  $T_1$  和  $T_2$  的黑体表面分别进行测量,  $T_2$  大于  $T_1$ , 测

得各光敏元对应  $\Delta T$  的平均输出差值  $\Delta S$ :  $\Delta S = S(T_2) - S(T_1)$ , 以及  $T_1$  温度时的 RMS 噪声  $N_{RMS1}$  和  $T_2$  温度时的 RMS 噪声  $N_{RMS2}$ ,  $N_{RMS}$  为  $N_{RMS1}$  值或  $N_{RMS2}$  值。 $\Delta T$  通常超过 NETD 数十倍, 以增加 NETD 测量的准确性<sup>[5]</sup>。然后按照下式进行计算:

$$NETD = \Delta T \frac{N_{RMS}}{\Delta S}$$
 (4)

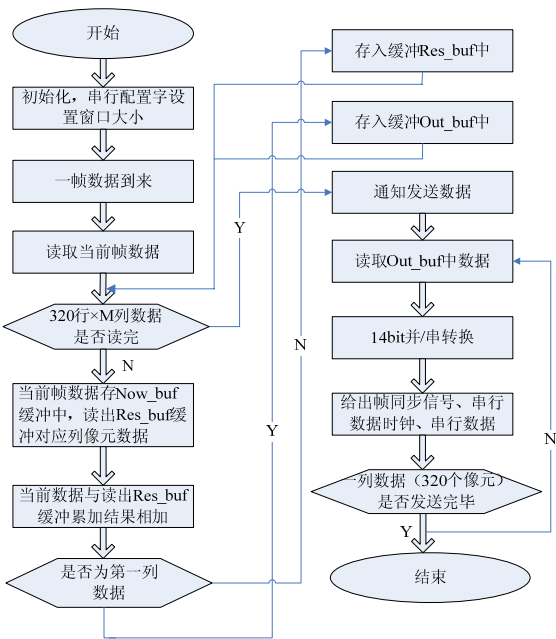


图 4 FPGA 内部数字 TDI 算法流程图

Fig.4 Digital TDI algorithm flow chart based on FPGA

图 5 和图 6 所测得的是在 300 K 黑体辐射下, 传感器积分时间为 160  $\mu$ s 时的 1 阶、4 阶 TDI 的各像元噪声等效温差情况。实验中用 300 K 和 320 K 黑体进行测量, 图中横轴代表的是传感器 1~320 列各像元, 纵轴为各像元的 NETD。其中图 5 和图 6 中像元平均 NETD 为 34 mK 和 18 mK。

3.2 实验和成像试验结果

为了验证数字 TDI 的探测弱信号的能力, 采用焦距为 75 mm 口径的光学镜头对温差对比度较弱的室内景物进行成像。实验以 1 阶数字 TDI 和 4 阶数字 TDI 成像效果为例进行成像效果的对比。图 7 和图 8 为数字 TDI 为 1 阶、4 阶, 传感器积分时间为 160  $\mu$ s 时对室内门窗成像效果图。从成像效果来看, 1 阶图像曝光量不足, 图像较模糊; 4 阶 TDI 图像比 1 阶 TDI 成像质量明显改善, 图像清晰, 对于弱信号的分辨能力更高, 这是由于 4 阶 TDI 情况下, 相当于对景物的积分时间等效延长了 4 倍。因此可以看出, 数字 TDI 能够有效提高系统探测灵敏度。

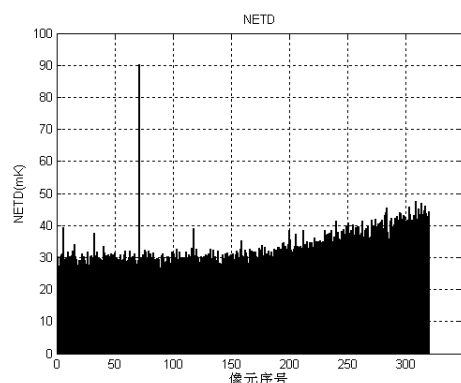


图5 1阶数字 TDI 像元 NETD  
Fig.5 NETD of 1-stage digital TDI

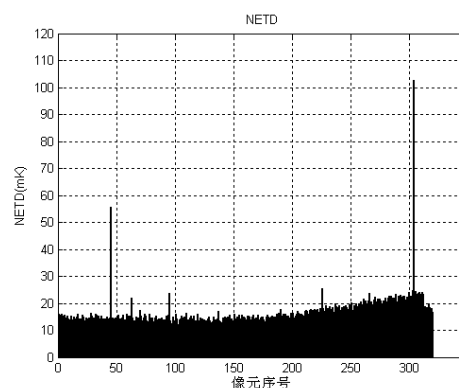


图6 4阶数字 TDI 像元 NETD  
Fig.6 NETD of 4-stage digital TDI

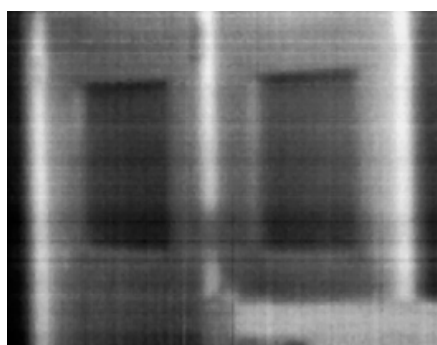


图7 1阶数字 TDI 成像图  
Fig.7 Imaging figure of 1-stage digital TDI

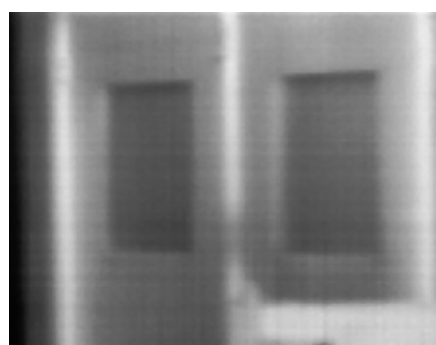


图8 4阶数字 TDI 成像图  
Fig.8 Imaging figure of 4-stage digital TDI

## 4 结论

本系统基于 CMOS 红外图像传感器设计了一个图像采集和处理系统,此系统利用面阵传感器实作用时取得了像元平均 NETD 为 18 mK 的优良信噪比特性和很好的图像质量。

## 参考文献:

- [1] Xie Baorong, Zhao Longcheng, Fu Yutian. An LWIR Imaging system with low noise characteristic based on CMOS TDI detector[C]// *Proceedings of IEEE ICSP2010*, 2010, **10**: 413-416.
- [2] Su Y K Juang, Fuh-Shyang, Chang Shing-Ming, et al, 1/f Noise and

现数字 TDI 功能从而提高红外成像系统信噪比。文章从理论上分析了数字 TDI 技术对于系统信噪比的影响。经实验验证,此红外图像系统在 4 阶数字 TDI

- specific Detectivity of HgCdTe photodiodes passivated with ZnS-CdS Films[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, **35**(5): 751-756.
- [3] Sizov, F F, Golenkov, A G, Zabudsky, V.V, et al. Noise measurements of HgCdTe LWIR arrays with CCD readouts[C]//*Proc. of SPIE on Materials for Infrared Detectors II*, 2002, **4795**: 136-146.
- [4] Kalwant Singh. Noise analysis of a fully integrated CMOS image sensor, *Proc. of SPIE*, 1999, **3650**: 44-51.
- [5] 张滢清, 王建宇, 傅雨田. 细分采样叠加技术在推扫式长波红外成像中的应用[J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(2): 263-267.