

红外面阵探测器 DTDI 技术的性能分析

苏晓锋^{1,2}, 潘胜达^{1,2}, 龚学艺^{1,2}, 杨育周^{1,2}, 陈凡胜¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 库链(BBD)结构的 CMOS 红外模拟 TDI 探测器, 由于其兼容普通 CMOS 工艺, 并可以提高系统的信噪比, 因而在空间遥感领域得到了广泛的应用。而基于焦平面面阵的数字 TDI(Digital Time Delay and Integration)技术的研究与应用尚在起步阶段。利用中国生产的 320×256 中波面阵红外探测器进行 DTDI 研究, 对比分析了模拟 TDI 探测器的电子转移效率、BBD 噪声、动态范围等方面的性能, 突出了 DTDI 在结构和性能上的优势, 并通过理论推导了 DTDI 对面阵探测器本身信噪比的提高, 非均匀性的改善, 同时分析了 DTDI 过程中盲元对性能的影响。最后, 通过实验得到了 16 级 DTDI 的信噪比增加为 2.5 倍, 非均匀性减少到 1.68%, 验证了 DTDI 技术对系统性能的改善, 为 DTDI 技术的应用提供了理论参考。

关键词: DTDI; 红外面阵; BBD; 信噪比; 非均匀性

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1025-07

Performance of DTDI technology based on IRFPA detector

Su Xiaofeng^{1,2}, Pan Shengda^{1,2}, Gong Xueyi^{1,2}, Yang Yuzhou^{1,2}, Chen Fansheng¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: The CMOS TDI of infrared detector based on bucket-brigade device (BBD) structure, has been widely used in the field of space remote sensing, it can compatible with the general CMOS process, and improve the signal-to-noise ratio (SNR) of the system. Compare with the analog TDI, the Digital Time Delay and Integration (DTDI) based on the infrared focal plane array is still in the initial stage. In this paper, the 320×256 MWIR FPA was used to do the DTDI research, and the electron transfer efficiency, the BBD noise and the dynamic range of the analog TDI was in a detail analysis to compare with DTDI. And the NU and blind pixel were also taken into consideration to analysis the DTDI performance. Finally in the experiment, the SNR can be increased to 2.5 times and the NU can be reached 1.68% after the 16-stage DTDI was used, which verify the improvement of the system performance by using DTDI technique.

Key words: DTDI; IRFPA; BBD; SNR; non-uniformity

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-09-03

作者简介: 苏晓锋(1987-), 男, 博士生, 主要从事空间遥感载荷电子学系统设计方面的研究。Email: fishsu@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 陈凡胜(1978-), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事空间遥感方面的研究。Email: cfs@mail.sitp.ac.cn

0 引言

随着遥感技术的发展,进行高灵敏度高分辨率的成像技术研究也就突显出了其必要性,特别是红外领域,由于其高穿透能力和全天候工作,可以实现诸如火情检测,威胁目标告警等。相比于可见探测器,红外探测器具有较低的信噪比,较高的非均匀性,而 TDI 技术的引入可以使其得到较大的改观。传统的 TDI 通常指电荷域的信号累加,即为模拟 TDI 技术,通常有两种信号传递结构:CCD(Charge-Coupled Device)结构和 BBD(Bucket-Brigade Device)结构。CCD 结构由于其复杂的供电系统和驱动时序给实际应用带来较大的复杂度,相比之下 BBD 结构克服了 CCD 这方面的缺点^[1],并且由于其兼容传统的 CMOS 工艺,因而在红外模拟 TDI 中得到了较为广泛的应用,但随着数字 TDI 技术的出现,其表现出了更大的灵活性,为此文中主要针对国内自行研制的 320×256 中波红外面阵探测器和基于 BBD 结构的 512×8 的 TDI 探测器进行讨论,详细论述了利用面阵探测器实现数字 TDI 技术的优势,并通过理论和实验验证了 DTDI 在系统信噪比和非均匀性上的改善。

1 数字 TDI 工作原理

对于数字 TDI 在可见探测器的应用比较常见,根据探测器的不同可以分为卷帘式和快照式两种,文中采用快照式的红外探测器进行讨论,图 1 为其数字 TDI 运算过程的基本工作原理,图(a)为视场不动,探测器扫描的示意。图(b)为等效物方运动(与扫描方向相反)情况下的信号传递图。图(a)中不同行代表着探测器上相同的像元区在不同时刻的成像位

置,其中红色虚线框内对应的是目标的同一成像视场,不同时刻探测器沿着扫描方向转动相应的视场。这里通过对探测系统进行扫描,可以改变像元对应的视场,当速度达到匹配时,相邻的图像帧对应的视场刚好相隔 1 个像元,即目标视场会被整行探测元遍历,利用这些像元进行延时累加,可以达到等效增加积分时间的目的,同时提高系统的性能。

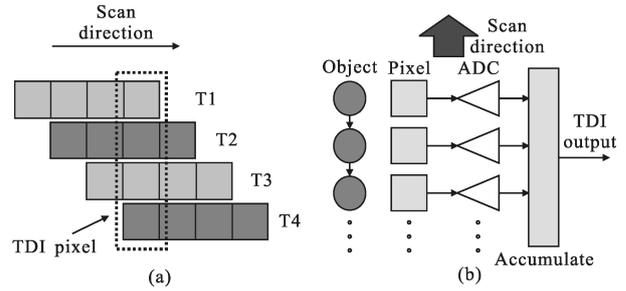


图 1 数字 TDI 基本原理示意图

Fig.1 Basic principle of DTDI

数字 TDI 是针对每次成像之后的结果进行操作的,为了实现信号累加需要将前一次成像的结果进行存储,在 TDI 级数不高的时候,完全可以利用 FPGA 内部的块存储资源进行数据的存储,通过流水线的作业进行数据的累加,为一种通过牺牲空间换时间的方式,相比之下,模拟 TDI 器件的电荷存储及累加部分直接做在探测器上,从而增加了探测器结构的复杂性。而数据域上的处理,可以根据需要修改 TDI 的级数,而不受器件限制,给 DTDI 带来了更多的灵活性和更高的计算精度。

2 模拟 TDI 与数字 TDI 的性能比较

常用的模拟型 CMOS 时间延迟结构,一般采用的是稜链(BBD)结构,如图 2 所示,图中由转移 MOS

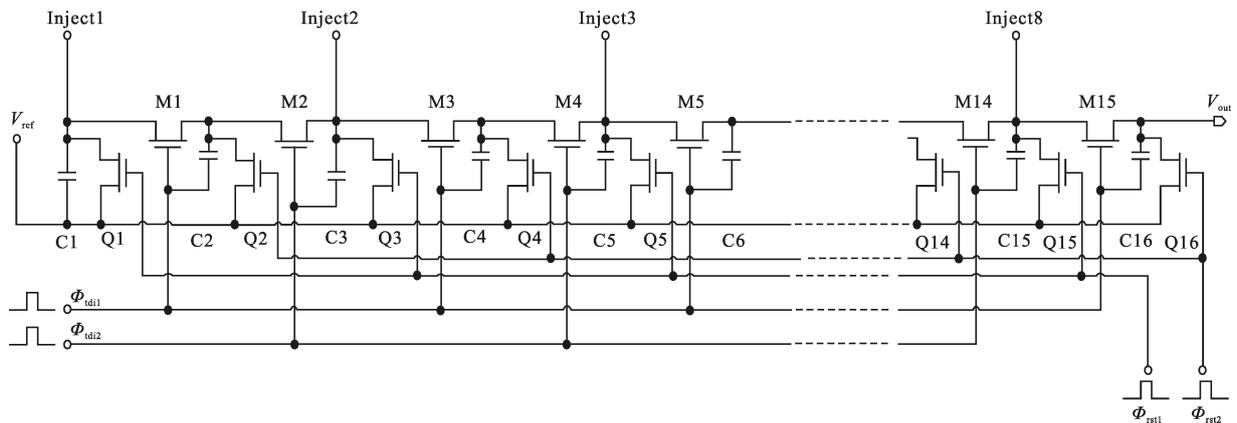


图 2 8 级模拟 TDI 的结构图^[2]

Fig.2 Structure of the analog TDI with 8-stage^[2]

管和转移电容组成,通过合理的控制驱动时序,利用转移管实现电荷的从左到右的信号转移,并且每次转移后下一级的信号进行电荷的累加,实现 TDI 过程。

BBD 结构由于其机构相对简单,兼容 CMOS 工艺,因而被广泛应用于短积分级数的模拟型 TDI 探测器中,但其也存在一定的问题,为了说明模拟 TDI 与数字 TDI 的优缺点,这里对 512×8 的 TDI 探测器进行分析。

2.1 电子转移效率

由于模拟 TDI 采用的是电荷域的信号转移,因而必须考虑到电子转移效率的影响,对于 8 级 TDI 可以看到对于第一个像元,要完成信号的输出需要通过 15 个转移管,对于 N 级 TDI,假设每次信号转移的效率为 α ,令每次积分产生的电荷 Q ,则到达传输级的电荷数可以表示为:

$$Q_{\text{all}}=Q\alpha^{(2N-1)}+\dots+Q\alpha^3+Q\alpha=\frac{\alpha(1-\alpha^{2N})}{1-\alpha^2}Q \quad (1)$$

则总的转移效率为:

$$\alpha_{\text{all}}=\frac{Q_{\text{all}}}{NQ}=\frac{\alpha(1-\alpha^{2N})}{(1-\alpha^2)N} \quad (2)$$

由于 α 是一个小于 1 的系数,所以随着 TDI 级数的增加,转移效率也会降低。图 3 为传输管电子转移效率分别在 0.99 和 0.999 下的总电子转移效率与 TDI 级数之间的关系。经计算可知,对于 8 级 TDI 单级电子转移效率为 0.99 的情况下的最终电子转移效率为 0.923 7,单级电子转移效率为 0.999 时的最终效率为 0.992。从图中可以看出:为了得到好的转移效果,需要有较小的 TDI 级数,并且要求 MOS 管在进行电荷转移时要有足够高的转移效率。

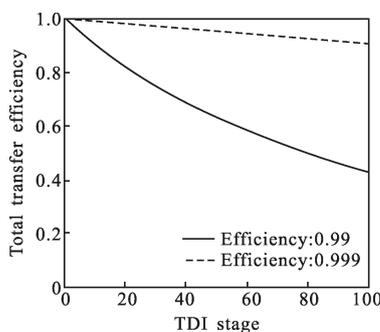


图 3 BBD 结构总电子转移效率与 TDI 级数的关系

Fig.3 Relationship between electron transfer efficiency and TDI stage in BBD structure

2.2 BBD 噪声

在 BBD 结构的模拟 TDI 中,KTC 噪声是最为明显的噪声源,这里 KTC 噪声存在于 TDI 传输中各

个管子相连的电容中,这个噪声会直接影响电荷转移和复位的值,其大小可表示为 $v_n^2=\frac{KT}{C}$,为了保证信号的完整传输,每一级信号传递到下一级信号有 6 次(其中包括 3 次电荷传递以及 3 次电容复位引入的)这样的噪声叠加,因而对于 M 级 TDI 这里引入的 KTC 噪声可表示为:

$$V_{\text{KTC_ATDI}}=\sqrt{\frac{6MKT}{C}} \quad (3)$$

而在数字 TDI 通常采用单元信号积分读出,这个只有在复位过程中会对积分电容引入 KTC 噪声,则 M 级数字 TDI 引入的 KTC 噪声可以表示为:

$$V_{\text{KTC_DTDI}}=\sqrt{\frac{MKT}{C}} \quad (4)$$

从而可以得到模拟 TDI 和数字 TDI 在 KTC 噪声水平上存在着如下的关系:

$$\frac{V_{\text{KTC_ATDI}}}{V_{\text{KTC_DTDI}}}=\sqrt{6} \quad (5)$$

上述只从探测器结构的角度对探测器中普遍存在的 KTC 噪声进行了比较,可以看出数字 TDI 在 KTC 噪声方面有着较大的优势,并且在实际应用过程中对于 KTC 噪声较大的情况,通常采用相关双采样(CDS)的方式,利用噪声的相关性进行 KTC 噪声的抑制,而 CDS 在模拟 TDI 中并不好实现,这使得数字 TDI 在噪声水平上的优势更为明显。

图 4 为 300 K 黑体温度下对 8 级模拟 TDI 探测

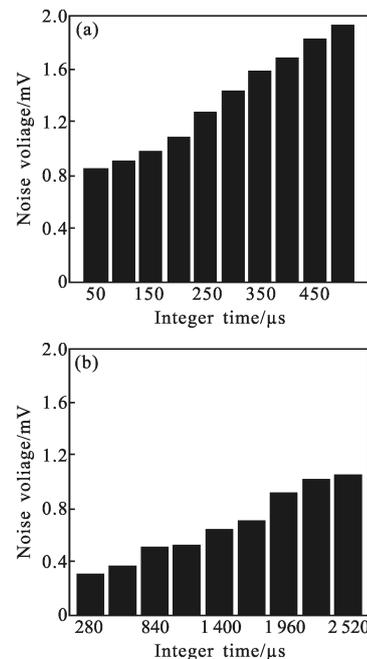


图 4 模拟 TDI 探测器和面阵探测器的噪声比较

Fig.4 Difference in noise between analog TDI and IRFPA detector

器和用于实现 DTDI 的面阵探测器在噪声水平上进行实际测量的结果。这里的模拟 TDI 器件和面阵器件都采用直接注入(DI)的方式,同时其积分电容都在 2 pf 左右,因而具有较高的可比性。由于探测器的信号还受到量子噪声的影响,因而噪声水平会随积分时间的增加而增加。TDI 过程可以等效为增加积分时间的过程,为了排除量子噪声的干扰,8 级模拟 TDI 积分时间为 50 us 时相当于面阵探测器的 400 us,积分时间为 150 us 相当于面阵的 1 200 us,通过比较可以得到用于实现 DTDI 的面阵探测器的噪声值远小于模拟 TDI 探测器噪声值,与前面 BBD 噪声的理论分析结果相符。

另一方面,由探测器动态范围的定义:

$$D = \frac{V_{\text{sat}}}{V_n} \quad (6)$$

由于模拟 TDI 的电容大小是固定的,即信号的饱和输出有一个极大值 V_{sat} ,而随着 TDI 级数的增加,噪声水平也随之增加,这会导致探测器的整体动态范围变小,从而对大动态范围的场景成像带来一定的影响,相比之下, M 级的数字 TDI,其饱和输出电压上限为 MV_{sat} ,而相应噪声水平为 $\sqrt{M} V_n$,可见其动态范围随之 TDI 级数的增加成平方根上升。

综上所述,数字 TDI 具有比模拟 TDI 更高的性能优势和使用灵活性,主要表现为:首先相比于模拟 TDI,数字 TDI 结构更为简单,使用更为方便;其次数字 TDI 采用的是电压域的信号,不存在模拟 TDI 中的电荷转移残留问题,即不会有拖尾的现象;再者数字 TDI 具有更低的噪声水平以及更大的动态范围,因而具有较大的应用前景。

3 数字 TDI 的性能分析

从模拟 TDI 和数字 TDI 的比较中可以看出数字 TDI 存在着明显的优势,下面就其性能通过理论进行推导,主要通过信噪比和非均匀性两方面进行考虑。

3.1 DTDI 的信噪比

对于面阵探测器的噪声可以分为探测器的 $1/f$ 噪声 $n_{1/f}$,光子噪声 n_{ph} ,探测器读出电路噪声 n_{read} ,信息获取电路噪声 n_{circuit} ^[3],由于各噪声不相关,则总噪声表示为 n_{totle} ,则信噪比为:

$$\text{SNR} = \frac{S_{\text{sign}}}{n_{\text{totle}}} = \frac{S_{\text{sign}}}{\sqrt{n_{1/f}^2 + n_{\text{ph}}^2 + n_{\text{read}}^2 + n_{\text{circuit}}^2}} \quad (7)$$

当采用 N 级 DTDI 时,每一次成像都要经历相同的过程,由于信号的相关性,总信号能量可以表示为:

$$S_{\text{sign}_N} = N \cdot S_{\text{sign}} \quad (8)$$

而由于噪声是不相关的,其噪声的总和可以利用下式表示:

$$n_{\text{totle}_N} = \sqrt{N \cdot (n_{1/f}^2 + n_{\text{ph}}^2 + n_{\text{read}}^2 + n_{\text{circuit}}^2)} \quad (9)$$

因而 N 级 DTDI 的信噪比可以表示为:

$$\text{SNR}_N = \frac{S_{\text{sign}_N}}{n_{\text{totle}_N}} = \sqrt{N} \cdot \text{SNR} \quad (10)$$

对比传统的模拟 TDI 系统,可以发现数字 TDI 多出了 $N-1$ 次的读出电路噪声和信息获取电路的噪声^[4],为了提高数字 TDI 的信噪比,这里就需要用于实现 DTDI 的面阵探测器要有较小的读出电路噪声和较小的信息获取电路噪声。通常情况下相比于探测器的噪声,信息获取系统的噪声很多时候是可以忽略的;又由于读出电路噪声,最明显的为 KTC 噪声^[3],而与模拟 TDI 探测器不同,面阵探测器的 KTC 噪声是可以通过相关双采样等方法来进行消除的,可见数字 TDI 在噪声水平上是有保证的。

3.2 DTDI 对非均匀性的影响

由于红外探测器的特殊性,其本身存在较大的非均匀性,下面针对红外 DTDI 过程中的系统非均匀性进行详细讨论。

假定探测器的响应满足线性响应关系^[5]:

$$V_{ij} = G_{ij} \Phi + O_{ij} \quad (11)$$

式中: i 和 j 分别表示探测元的坐标值,假定行方向为扫描方向,列方向为像元方向,则此时利用 DTDI 技术对同一个目标视场进行成像得有如下关系:

$$\begin{cases} V_{ij} = G_{ij} \Phi_{\text{targ}} + O_{ij} \\ V_{ij+1} = G_{ij+1} \Phi_{\text{targ}} + O_{ij+1} \\ \dots\dots \\ V_{ij+N-1} = G_{ij+N-1} \Phi_{\text{targ}} + O_{ij+N-1} \end{cases} \quad (12)$$

可以得到 DTDI 的输出(这里采用信号的平均来表示)为:

$$V_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{k=j}^{j+N-1} V_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{k=j}^{j+N-1} G_{ik} \Phi_{\text{targ}} + \frac{1}{N} \sum_{k=j}^{j+N-1} O_{ik} = G_i \Phi_{\text{targ}} + O_i \quad (13)$$

式中: N 为 DTDI 的级数; G_i 为第 i 行的 DTDI 增益; O_i 为第 i 行的 DTDI 偏移,有:

$$\begin{cases} G_i = \frac{1}{N} \sum_{k=j}^{j+N-1} G_{ik} \\ O_i = \frac{1}{N} \sum_{k=j}^{j+N-1} O_{ik} \end{cases} \quad (14)$$

从公式(15)可以看出红外 DTDI 中, 由于其在扫描方向上的累加作用, 扫描方向上的非均匀性被完全消除。

而对于列方向上, 由于对于整个焦平面, 像元的响应率 G_{ij} 和偏移 O_{ij} 具有一定的统计随机性, 可表示为:

$$\begin{cases} G_{ij} = \bar{G} + n_k \\ O_{ij} = \bar{O} + m_k \end{cases} \quad (15)$$

这里令 n_k 满足均值为 0, 方差为 δ_1 的高斯白噪, m_k 为满足均值为 0, 方差为 δ_2 的高斯白噪, 则 DTDI 的系数可以进一步表示为:

$$\begin{cases} G_i = \frac{1}{N} \sum_{k=j}^{j+N-1} G_{ik} = \bar{G} + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} n_k \\ O_i = \frac{1}{N} \sum_{k=j}^{j+N-1} O_{ik} = \bar{O} + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} m_k \end{cases} \quad (16)$$

随着 DTDI 级数的增加, 根据 n_k 和 m_k 的统计特性有:

$$\begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} n_k \rightarrow 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} m_k \rightarrow 0 \end{cases} \quad (17)$$

即 $G_i = \bar{G}, O_i = \bar{O}$, 可见 TDI 技术在一定程度上也降低了行与行之间的非均匀性, 当 TDI 级数趋于无穷时, 非均匀性也会随之消失。

3.3 盲元对 DTDI 影响

同样由于工艺的限制, 红外面阵探测器还存在一个不可回避的问题, 即盲元的存在, 盲元在探测器中往往表现为响应过低的死像元和噪声过大的过热像元, 这个在实际使用中会对同一行的像元的 TDI 效果打上一个折扣, 这里主要分成两种情况: 对于死像元的影响, 由于其响应率已经不能再用公式(17)来表示了, 因而会将响应转换成非均匀性, 使 TDI 结果的横条纹(扫描方向条纹)表现较为明显; 而对于过热像元则主要表现为增加了其所在行的噪声水平, 使信噪比有所下降。可见由于盲元的限制, 使用时需要选择面阵探测器中比较完整的区域进行 TDI 运算, 同时考虑到 DTDI 是在数字域进行操作的, 可以利用数字信号处理的优势进行相应的盲元剔除操作, 以消除盲元的影响。

4 实验结果

为了验证 DTDI 对系统噪声的影响, 下面利用

320×256 的中波红外面阵探测器进行实验测量。

图 5 是使用国内自行研制的 320×256 红外面阵探测器在积分时间为 1.96 ms 下对不同黑体温度进

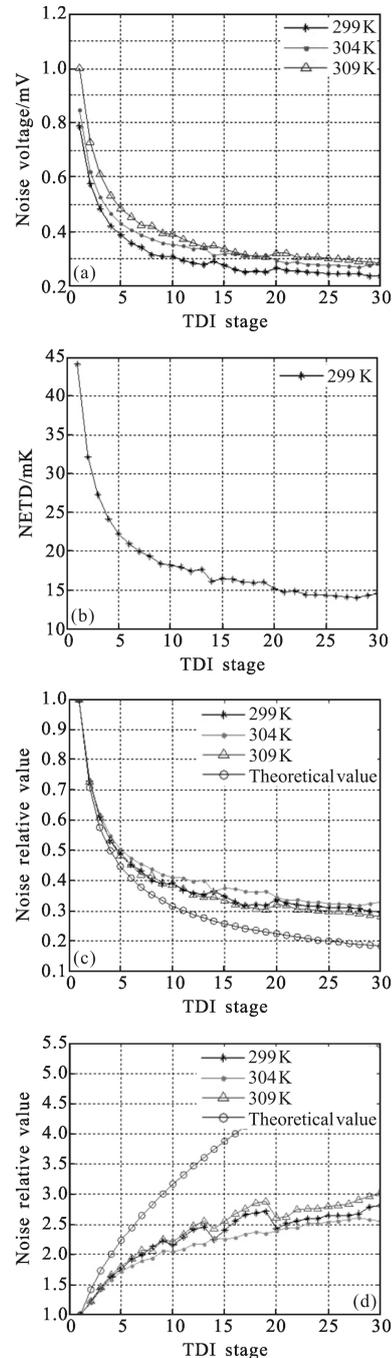


图 5 数字 TDI 级数对系统性能的影响

Fig.5 Effects on the system performance in different DTDI stages

行测试的结果, 其中图(a)表示不同温度下的系统噪声随 TDI 级数的变化曲线, 图(b)为在温度为 299 K 的情况下测得的系统平均 NETD 随 TDI 级数的变化关系, 当 TDI 级数达到 16 级时, NETD 可以达到

16.4 mK, 图(c)为系统噪声相对值的变化情况并与理论曲线进行比较,图(d)为信噪比和 TDI 级数的关系曲线,得到 16 级 DTDI 的信噪比增加了 2.5 倍。

通过对实验数据的分析,随着 TDI 级数的增加,系统的噪声水平会有显著的下降,这与理论相符。同时随着 TDI 级数的增加,实际值与理论值会开始出现较大的偏离,这个主要是在实际测试的过程中,系统噪声并非完全不相关。

红外非均匀性是面阵探测器比较突出的问题之一,下面针对 TDI 级数对红外非均匀性的影响做了具体的实验验证,通过实验验证了数字 TDI 对探测器非均匀性的改善与其 TDI 级数的关系,如图 6 和图 7 所示。

图 6(a)为非均匀性和 TDI 级数的关系曲线。可以看出随着 TDI 级数的增加,系统的非均匀性得到了较大的改观,这与前面的推论相符;图 6(b)为进行 23 级 TDI 后的输出响应,仍可发现列方向上存在着较大非均匀性,这个是由于窗口和冷屏等光学系统的影响引入的辐射非均匀性^[6-8],由于其值比较大,实际使用过程中需要进行校正。

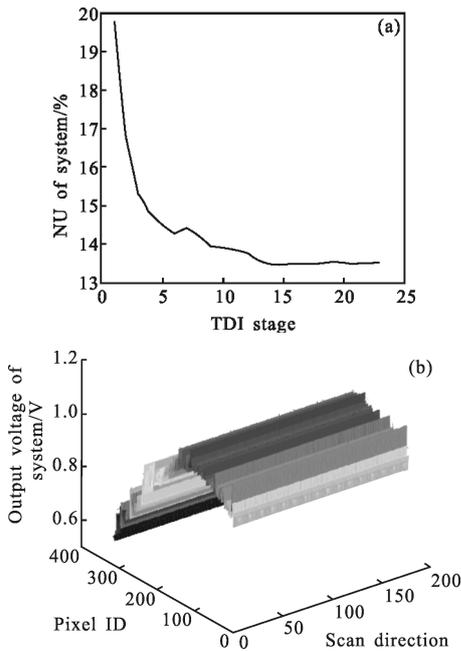


图 6 非均匀性与 TDI 级数间的关系
Fig.6 Relationship between no-uniformity and TDI stage

为了去除辐射引入的非均匀性,这里先对探测器输出进行一阶的非均匀校正,初步的完成在列方向上的辐射非均匀性的去除,再进行 TDI 运算,得到

了非均匀与 TDI 级数的关系如图 7 所示,可以看出一阶的非均匀校正已经可以将系统的非均匀性降低到比较小的水平,特别是针对辐射非均匀性的抑制,而随着 TDI 的引入,系统响应的非均匀性还可以进一步降低,达到了 1.68%,这从实验验证了数字 TDI 在系统非均匀性能上的改善。

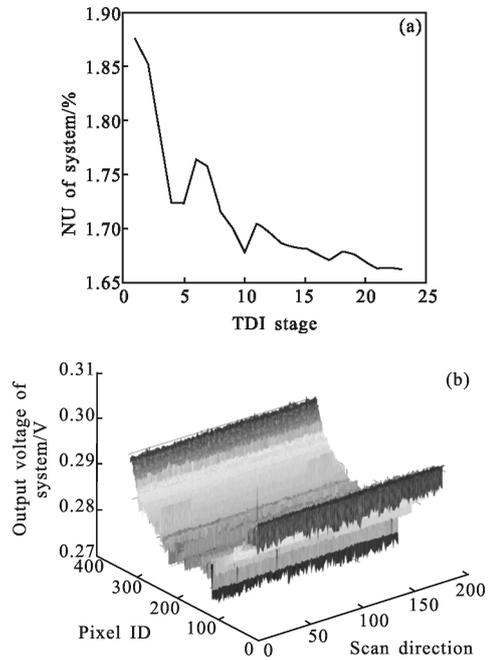


图 7 非均匀校正后得到的非均匀性与 TDI 级数的关系
Fig.7 Relationship between NU and TDI stage after NUC

图 8 为 DTDI 成像的结果,这里采用的量化位宽为 12 bit,图中是对小车上的杜瓦和两个杯子的像,其中图(a)为图像数据 5~12 bit 的显示结果,图(b)

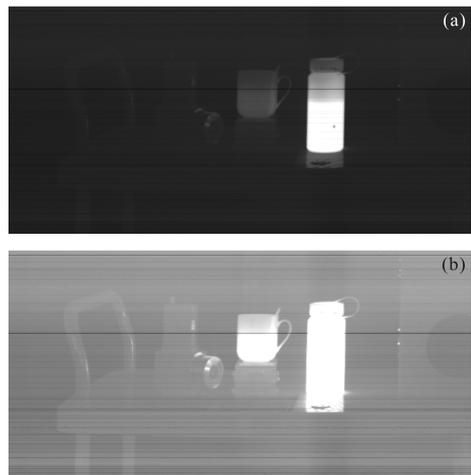


图 8 DTDI 实验成像结果
Fig.8 DTDI experiment results

为图像数据 3~10 bit 的显示结果。从图中可以看出成像已经比较细腻,但横条纹存在仍比较明显,这个很大程度上是受限于探测器中盲元的影响,关于 DTDI 中盲元剔除的问题,笔者将在后续的工作中将做进一步讨论。

5 结 论

文中通过对数字 TDI 进行了详细的理论分析,验证了数字 TDI 对系统信噪比、NETD 以及探测器非均匀性的改善作用;并将其与 BBD 结构 CMOS 模拟 TDI 探测器进行对比,从信号传递、系统噪声、系统动态范围等角度展开讨论,验证了数字 TDI 存在较明显的优势;最后通过实验进一步验证了文中的理论分析,给出了成像结果图。

参考文献:

- [1] Fossum Eric R. CMOS image sensors: electronic camera-on-a-chip [J]. *IEEE Trans Electron Device*, 1997, 44 (10): 1689-1698.
- [2] Zhang Junling, Feng Qi, Chen Honglei. A novel 512 × 8 ROIC with time-delayed-integration for MW infrared focal plane array[C]//SPIE, 2011, 8139: 1-10.
- [3] Shen Xiaoyan. Methods of canceling noise in CMOS read-out integrated circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(6): 659-661. (in Chinese)
- [4] Xie Baorong, Feng Shuyi, Fang Caiting, et al. Infrared imaging system design based on digital TDI technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(4): 207-210. (in Chinese)
- [5] Liu Huitong, Yi Xinjian. Two point nonuniformity correction for IRFPA and its physical motivation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 76-78. (in Chinese)
- [6] Duan Dong, Sha Shengchun, Zhang Shuanglei, et al. Non-uniformity rectification methods of IRFPA detector radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (10): 2621-2624. (in Chinese)
- [7] Zhuang Jisheng, Wang Yifeng, Fan Naihua, et al. Correction of test data of infrared focal plane detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 195-198. (in Chinese)
- [8] Mao Jingxiang, Fan Naihua, Wang Yifeng, Calculation of solid angle of pixels of IRFPA detector under circular cold shield and its imaging simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 957-960. (in Chinese)